¿QUÉ SABEMOS DE?

La vida y su búsqueda más allá de la Tierra

Ester Lázaro Lázaro




CSIC

CATARATA

La vida y su búsqueda más allá de la Tierra

Ester Lázaro Lázaro





Colección ¿Qué sabemos de?

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
https://cpage.mpr.gob.es









http://editorial.csic.es
publ@csic.es

Fuencarral, 70
28004 Madrid
Tel. 91 532 20 77
www.catarata.org

isbn (csic) 978-84-00-11130-4
isbn electrónico (csic) 978-84-00-11131-1
isbn (catarata): 978-84-1352-682-9
isbn electrónico (catarata) 978-84-1352-683-6
nipo 833-23-016-3
nipo electrónico 833-23-017-9
depósito legal: M-8.270-2023
thema: pdz/wnx/pgs

impreso en artes gráficas coyve



A mi familia.

Índice

CAPÍTULO 1
El universo y la vida

Una sola espiga de trigo en un campo grande sería tan extraña
como un único mundo en el espacio infinito.
Atribuido a METRODORO DE QUÍOS

Queremos creer

"I want to believe". Esta es la icónica frase asociada a una de las series sobre extraterrestres más famosas de la historia de la televisión: *Expediente X*. En ella, los agentes Fox Mulder y Dana Scully investigan un conjunto de sucesos paranormales, relacionados con las posibles visitas a nuestro planeta de seres extraterrestres, que el gobierno de Estados Unidos intenta ocultar a la opinión pública. Ese halo de secreto y misterio es uno de los mayores alicientes de gran parte de la ficción construida en torno a la posibilidad de vida extraterrestre, y *Expediente X* no fue una excepción. Por un lado, queremos creer que esa vida existe, no solo para comprender cuál es nuestro lugar en el universo, sino también porque el hecho de que en otros mundos pueda haber seres similares a nosotros nos proporciona cierta ilusión para trascender lo limitado de nuestra existencia. Una ilusión que, sin embargo, no está exenta de temor ante la posible realidad de una civilización más avanzada que la nuestra que tuviera intenciones hostiles.

Un ejemplo de nuestras ganas de creer lo representa todo el imaginario construido en torno al fenómeno ovni

(objeto volador no identificado), sobre todo durante los años cincuenta y sesenta. Sin embargo, la realidad es que, hoy por hoy, el único ejemplo de vida que conocemos es la terrestre. Una vida, además, cuya comprensión se nos escapa en muchos aspectos y que no ha agotado su capacidad para sorprendernos. Todos somos libres de creer o no en seres extraterrestres, pero las creencias son solo eso, creencias. Para ser consideradas certezas deben ser demostradas y, para ello, no nos queda más remedio que recurrir a la ciencia.

La ciencia que se ocupa del estudio de la vida es la biología. Cuando esta ciencia se aplica a la vida en un sentido amplio, incluyendo sus posibles manifestaciones en otros mundos, surge una nueva disciplina, la astrobiología, que intenta dar respuesta a varias de las grandes preguntas que el ser humano se ha hecho desde que tiene consciencia de su propia existencia: ¿cómo surgió la vida en la Tierra?, ¿cuáles son sus límites?, ¿qué número de planetas existen con capacidad para sostenerla?, ¿puede haber vida que sea diferente de la terrestre? Y, no menos importante, en caso de que encontremos otras vidas en el cosmos, ¿cómo nos relacionaremos con ellas? Las primeras respuestas a estas preguntas surgieron en el seno de las mitologías y las religiones, pero llegó un momento en que eso no fue suficiente y se dio paso a la lógica y la observación racional del mundo. Con el tiempo, los avances en la instrumentación y el desarrollo tecnológico permitieron que se diseñara el método científico, cuya implantación en el siglo XVII dio lugar a la ciencia moderna, la cual, como era de esperar, no ha sido ajena a la gran cuestión de si estamos solos en el universo.

La existencia de vida en otros mundos es una cuestión compleja para la que no existen respuestas simples que puedan ser aportadas por una única rama de la ciencia. En lugar de eso, la astrobiología requiere una aproximación que englobe e integre los conocimientos de diferentes disciplinas, incluyendo algunas que tradicionalmente no se han asociado con

el conocimiento de la vida. Entre ellas se encuentran la física y la química —ya que la vida no puede contradecir sus leyes—, la geología —porque cada entorno planetario tiene sus características peculiares que facilitan o no la existencia de vida—, la astrofísica —que amplía nuestro conocimiento del universo—, las matemáticas —que definen los principios universales de la naturaleza— y, aunque puedan no parecer esenciales en el momento inmediato, la ética y la filosofía que, en caso de encontrar otras vidas, nos ayudarán a relativizar la posición de la nuestra.

A pesar de nuestra insistencia en la búsqueda de respuestas basadas en la ciencia, cuando se habla de vida extraterrestre es importante no olvidarnos de la imaginación. A fin de cuentas, la astrobiología trata de entender algo que, de momento, ni siquiera sabemos si existe y que, en caso de que lo encontremos, puede que nos cueste identificarlo, limitados como estamos por lo que conocemos, la vida terrestre en este caso.

El debate sobre la pluralidad de mundos (habitados o no)

Basta con echar un vistazo a nuestro alrededor para darnos cuenta de que el ser humano no es la única manifestación de la vida y que nuestro planeta no es lo único que existe en el universo. En particular, una simple mirada al cielo nos hace sentir pequeños ante todo lo que parece haber ahí arriba. Si a eso se añaden la gran cantidad de fenómenos que escapaban a la comprensión de los primeros representantes de nuestra especie, no es de extrañar que, desde hace milenios, la fantasía humana haya situado en los cielos a seres dotados de poderes extraordinarios que regían nuestros destinos. En cierto sentido, podría decirse que esos dioses antiguos fueron los primeros extraterrestres. Es muy probable que gran parte de

la fascinación que ejerce sobre nosotros la posibilidad de vida fuera de la Tierra se deba a las mágicas propiedades atribuidas a esos seres fantásticos imaginados por nuestros antepasados. Poco a poco, las fuerzas sobrenaturales atribuidas a los dioses fueron sustituidas por interpretaciones más racionales de lo que sucedía en el universo. Así, ya en la Grecia clásica, se inició un debate sobre la existencia de otros mundos y sus posibles moradores. Desde entonces, ese debate ha mantenido ocupadas algunas de las mentes más prestigiosas de todos los tiempos.

Anaximandro, que vivió en Mileto entre los siglos VII y VI a. C., propuso una idea revolucionaria en su tiempo y es que la Tierra es un cuerpo que flota en un vacío infinito, en el que los conceptos de arriba y abajo o izquierda y derecha solo tienen sentido si hay un observador que proporcione un punto de referencia. Algo más adelante, los filósofos denominados *atomistas*, y cuyos más reconocidos representantes fueron Demócrito y Leucipo (ambos nacidos en el siglo V a. C.) introdujeron la idea de que el mundo está compuesto por una infinidad de diminutas partículas, los átomos. Esas partículas se mueven al azar, chocando unas con otras hasta dar lugar a la formación de todo lo que existe. Si los átomos son infinitos, no hay ningún límite para lo que puede surgir a partir de ellos, abriéndose así la posibilidad de la existencia de mundos diferentes al nuestro, que incluso podrían estar habitados.

Anaxágoras hablaba de las semillas de la vida, dando así pie a que, en ocasiones, haya sido considerado el padre de la hipótesis de la panspermia, la idea de que la vida se originó en algún lugar del espacio desde el cual viajó a la Tierra y quizás también a otros lugares del universo. Se cree que la propuesta de las semillas de la vida fue inspirada por la frase de otro filósofo, Parménides, quien afirmaba que "de la nada, nada sale. Todo sale del ser". Esta reflexión llevó a Anaxágoras a pensar que la materia es divisible hasta el infinito y que cada cosa está constituida por partes de todas las cosas. La forma en

que, a partir de una materia que contiene todo, pueden originarse entidades concretas, capaces de ser reconocidas claramente como animales, rocas, agua o personas, es algo que no queda claro en la filosofía de Anaxágoras. Sin embargo, la idea, con ciertas variaciones, de que la vida en la Tierra surgió inicialmente a partir de semillas procedentes del cielo se ha mantenido hasta nuestros días, con cierta razón, como veremos en los capítulos siguientes.

Epicuro, durante los siglos IV-III a. C., hizo suya la idea de la pluralidad de mundos, y aunque muchos de sus escritos han desaparecido, otro filósofo posterior, Lucrecio, se encargó de mantener vivas sus reflexiones en su libro *De rerum natura* o *Sobre la naturaleza de las cosas*, construido en forma de un bello y largo poema. En él también habla de semillas, cuyo fruto en otros mundos podría dar lugar a otras razas de hombres y otras generaciones de la naturaleza, una reflexión que concuerda muy bien con nuestra visión actual de que, en caso de existir, la vida fuera de la Tierra no tendría por qué ser igual a la que conocemos.

Contrariamente a los atomistas, Platón argumentaba que solo hay un creador y, por tanto, solo puede haber un mundo. Sin embargo, el principio de plenitud formulado por él mismo, y según el cual no se puede restringir el poder de ese creador único, fue utilizado en épocas posteriores para argumentar la existencia de otros mundos. Aristóteles, discípulo de Platón, desarrolló una cosmología que fue ampliamente aceptada por la Iglesia católica y que no fue rebatida hasta la época en que científicos como Nicolás Copérnico, Galileo Galilei, Johannes Kepler o Isaac Newton demostraron claramente que, a pesar de su capacidad explicativa, el modelo aristotélico distaba mucho de ser correcto.

Según Aristóteles, el universo, cuyo centro es la Tierra, se compone de dos partes bien diferenciadas separadas por la esfera en la que se sitúa la Luna. Todo lo que existe bajo la esfera de la Luna estaría formado por cuatro elementos:

tierra, aire, agua y fuego, que combinados en la forma adecuada podían dar lugar a todas las manifestaciones de la materia. La parte del universo situada por encima de la esfera de la Luna sería un lugar especial, cuyos objetos estarían formados por un único elemento, al que Aristóteles denominó *quintaesencia*, *quinto elemento* o *éter*. Estos objetos no se desplazarían en dirección al centro de la Tierra, sino en forma paralela a su superficie, de modo que el movimiento de cada uno de ellos definiría una esfera independiente de la del resto. Como vemos, en la cosmología aristotélica no había cabida para la existencia de otros mundos similares a la Tierra, ya que los cuerpos celestes estaban formados por un elemento diferente a los que existen en la materia terrestre. Esa peculiaridad probablemente era lo que justificaba el lugar privilegiado de nuestro planeta en el universo y la existencia de vida en él.

Las ideas de Aristóteles encajaban bien con el relato del Génesis, el cual no dejaba lugar para la existencia de otros mundos. Posteriormente, el Nuevo Testamento introdujo la figura de Jesucristo, el salvador de la humanidad. Creer en otros mundos habitados habría hecho necesaria la existencia de otros salvadores para los pobladores de esos mundos, algo que planteaba conflictos a los teólogos y que mantuvo viva la idea de un único mundo habitado en el que había una gran diversidad de especies, pero solo una, el ser humano, había sido creada a imagen y semejanza divinas, lo que justificaba que todo el resto de seres vivos estuviera a nuestro servicio.

Sin embargo, ni siquiera todo el mundo en el seno del cristianismo en plena Edad Media aceptaba sin dudar las ideas aristotélicas. En 1277, el obispo de París, Étienne Tempier, publicó una lista de 219 proposiciones a rechazar, entre las que, basándose en el principio de plenitud de la filosofía platónica que ya hemos mencionado, se encontraba la idea de que Dios no pudiera haber creado otros mundos diferentes al nuestro. Más adelante, en 1440, el cardenal Nicolás de Cusa, en su obra *De docta ignorancia*, apoyaba de forma

elocuente la idea de la pluralidad de mundos, defendiendo además que no había diferencia entre la materia terrestre y la celeste. A De Cusa se le atribuye una frase que se podría considerar precursora de las ideas actuales sobre el cosmos: "Para un observador situado en cualquier lugar de la esfera terrestre le parecerá que ese lugar es el centro del universo". Parece por tanto lógico que, para otros observadores situados en otras esferas, el centro del universo sería la posición por ellos ocupada.

Los avances tecnológicos que acompañaron la revolución científica del Renacimiento proporcionaron el caldo de cultivo apropiado para que las ideas sobre la existencia de otros mundos similares al nuestro quedaran demostradas de forma irrefutable. El gran punto de inflexión en el pensamiento de la época tuvo lugar gracias a las contribuciones científicas realizadas por Nicolás Copérnico en el siglo XVI, quien, basándose en cálculos y observaciones, propuso que la Tierra no era el centro del universo conocido, sino que este era el Sol, alrededor del cual nuestro planeta se movía describiendo una órbita similar a las del resto. También argumentó que la Tierra posee un movimiento de rotación alrededor de sí misma, que la Luna gira alrededor de ella y que el universo debía tener un tamaño mucho mayor que el que se creía hasta entonces.

Intuyendo lo revolucionario de las ideas heliocéntricas, Copérnico no permitió que estas se publicaran hasta el año de su muerte, fecha en que su obra *Sobre la revolución de las esferas celestes* pudo finalmente ver la luz. Giordano Bruno no fue tan cauteloso como Copérnico. Además de hablar de la pluralidad de mundos, en sus obras expresó abiertamente que al menos algunas de las estrellas son soles que poseen sus propios planetas, muchos de los cuales podrían estar habitados. Si tenemos en cuenta que el primer planeta extrasolar que gira alrededor de una estrella similar al Sol no se descubrió hasta el año 1995, es fácil darse cuenta de lo revolucionario del pensamiento de

Giordano Bruno, el cual rápidamente entró en conflicto con las doctrinas de la Iglesia católica, que lo condenó a morir en la hoguera. Sin lugar a dudas, este es uno de los episodios más tristes de la historia de la ciencia, en el que se muestra lo difícil que es cuestionar los dogmas establecidos y las consecuencias fatales que esto puede acarrear.

Los descubrimientos de los años posteriores no dejaron duda a la existencia de otros mundos. Galileo Galilei pronto anunció el descubrimiento de montañas en la Luna y la existencia de cuatro cuerpos celestes que orbitaban alrededor de Júpiter, formando lo que parecía ser un sistema solar en miniatura. Si ya Copérnico nos había hecho ver que la Tierra era un planeta más, Galileo nos mostraba que otros planetas podrían ser incluso más importantes que el nuestro, ya que podían poseer un número mayor de satélites. Para Johannes Kepler, este fue un descubrimiento crucial, ya que cualquier planeta lo suficientemente poderoso para tener lunas también lo sería para tener vida sobre él.

El debate científico sobre la pluralidad de mundos inspiró una amplia literatura a medio camino entre la divulgación científica y la ciencia ficción, como *El descubrimiento de un mundo en la Luna* (1638), de John Wilkins, que trata sobre los hipotéticos habitantes de nuestro satélite, los selenitas, y de los beneficios que obtendríamos de comerciar con ellos. ¡Mucho antes de conocer la existencia de recursos minerales en los asteroides o en la Luna, ya se pensaba en los posibles beneficios económicos que se podrían obtener de la explotación de otros cuerpos planetarios! En *Conversaciones sobre la pluralidad de los mundos* (1686), Bernard Le Bovier de Fontenelle relata una serie de diálogos entre una marquesa y un filósofo en los que se tratan temas como el modelo heliocéntrico o la posibilidad de vida extraterrestre. Las conversaciones, además, se adornan con descripciones sobre los rasgos de personalidad más probables que tendrían los habitantes de cada planeta particular. Así, los habitantes del cálido Venus estarían

siempre alegres y pensando en fiestas, mientras que los del frío Saturno serían mucho más serios y reflexivos. Casi dos siglos después, Camille Flammarion, en su obra *La pluralidad de los mundos habitados* (1862), expuso de forma mucho más rigurosa sus ideas sobre las condiciones de habitabilidad de los cuerpos celestes, teniendo en cuenta los conocimientos de la época sobre astronomía, fisiología y filosofía de la naturaleza. Por último, para completar esta breve revisión literaria, no podemos olvidarnos de Micromegas, el gigante alienígena ideado por Voltaire en la obra del mismo título publicada en 1752. Micromegas procedía de un planeta que giraba alrededor de la estrella Sirio. Viajando en un cometa, y tras hacer una breve parada en Saturno, consigue llegar a la Tierra para observarnos. Desde su inmensa altura y aguzada percepción, los humanos le parecemos seres insignificantes, con muy escasa inteligencia. Probablemente esta sea una de las primeras veces que se plantea explícitamente la posibilidad de vida extraterrestre superior a nosotros.

Casi un siglo después de la publicación de *Micromegas*, en 1835, el periódico neoyorquino *The Sun* informaba de que el reputado astrónomo sir John Herschel había observado una gran variedad de especies en la Luna, entre las que se encontraban seres humanos con alas, unicornios azules, manadas de bisontes… Evidentemente, todo resultó ser un engaño del periodista que escribió la noticia. Aunque leer esto actualmente pueda hacernos sonreír, lo cierto es que refleja muy bien cómo en el imaginario colectivo ya se había hecho fuerte la posibilidad de que hubiera vida extraterrestre.

Vemos que, poco a poco, las investigaciones en astronomía consiguieron desplazar a la Tierra de su lugar privilegiado en el universo, acercándola a una posición que no se diferencia en nada, a nivel de jerarquía, del resto de planetas que giran alrededor del Sol. A nivel popular ya se consideraba como muy probable que alguno de esos planetas estuviera habitado. ¿Qué sucedía mientras tanto en las investigaciones

sobre la vida y, en particular, sobre la posición del hombre respecto al resto de las criaturas terrestres?

El debate sobre el origen y la evolución de la vida

En paralelo al debate en astronomía sobre la pluralidad de mundos, en biología se libraba otro similar con respecto al origen de la vida. La mayoría de las religiones siempre han otorgado a una entidad divina la capacidad de la creación de la vida. Todas las especies fueron creadas por un dios y, a partir de ese momento, se reprodujeron a través de distintas estrategias. Sin embargo, las enormes diferencias entre las propiedades de la materia viva y la inerte pronto animaron a los pensadores y filósofos de diversas culturas a intentar identificar qué era aquello que hacía que la vida se comportara de forma tan distinta a como lo hacía la materia no viva.

Retrocedamos de nuevo a la Grecia clásica para conocer qué opinaban sus filósofos sobre este tema. Según Anaximandro, la vida tenía su origen en procesos naturales que daban lugar a una naturaleza cambiante, a pesar de la sensación de inmutabilidad que solemos apreciar en el curso de nuestra corta existencia. Para él, los primeros animales surgieron del agua o del barro calentado por el sol y de allí pasaron a la tierra, dando lugar a una transición de especies que puede considerarse una anticipación de las teorías de la evolución biológica posteriores. En esa época, encontrar restos de seres vivos más semejantes a rocas que a la materia que compone la vida —los fósiles— en lugares que aparentemente no eran su lugar natural (por ejemplo, restos de peces y moluscos en las laderas de una montaña) fue una cuestión difícil de resolver. La interpretación resultaba todavía más difícil cuando las características morfológicas de esos seres vivos no coincidían con las de ninguna de las especies biológicas existentes, algo que condujo a hipótesis sobre su origen que estaban llenas de fantasía.

Aristóteles, aun manteniendo la idea de una naturaleza cambiante, inspiró una interpretación para los fósiles que hoy sabemos que no es cierta. Según este filósofo, la materia viva adquiría sus propiedades especiales gracias a una fuerza generativa natural que denominó *entelequia*. Para sus seguidores, los fósiles pasaron a ser fracasos de la acción de esa fuerza que, en ocasiones, actuaba creando formas que se parecían a la vida, pero que no lograban adquirir sus propiedades. Tuvieron que pasar cientos de años para que los fósiles pasaran a ser considerados restos de seres vivos. Quedaban todavía por explicar las razones de su desaparición y su presencia en lugares que parecían no corresponderles.

Una de las explicaciones más en boga hasta bien entrado el siglo XVII afirmaba que los fósiles representaban restos de especies que no consiguieron sobrevivir al diluvio universal. Esta idea también fue cuestionada, dadas las enormes distancias a las que aparecían algunos fósiles respecto a los lugares en los que vivían sus parientes vivos más cercanos. Poco a poco, los estudios de Niels Stensen, Georges Louis Leclerc, Charles Lyell y Georges Cuvier, entre otros, lograron establecer la idea de que esos restos petrificados pertenecían a especies extinguidas, aunque no necesariamente por el diluvio universal, sino por una alternancia de procesos catastróficos y graduales que se habían sucedido a lo largo de la historia de la Tierra, moldeando sus características. Como consecuencia, a finales del siglo XVIII, el germen de la idea de que los seres vivos actuales en realidad podían proceder de la transformación de otros que vivieron en el pasado ya estaba plantada.

La creencia en la existencia de una fuerza en la materia viva que estaba ausente en la materia no viva dio origen a una de las teorías que más han perdurado en la historia de la humanidad. Nos estamos refiriendo a la teoría de la generación espontánea, según la cual algunos pequeños organismos eran capaces de originarse a partir de la materia inerte, sobre todo si esa materia había estado viva en algún momento. La teoría,

que nunca fue demostrada, tiene su origen en la observación directa, sobre todo del hecho de que algunos pequeños animales o plantas parecían surgir de la materia orgánica en descomposición. Aunque estas ideas actualmente puedan parecernos descabelladas, tardaron siglos en refutarse, siendo el proceso un claro ejemplo de lo cuidadoso que se debe ser al aplicar el método científico cuando se trata de cuestionar "verdades" aceptadas por una gran parte de la sociedad.

En 1668, el médico italiano Francesco de Redi demostró que los insectos no surgían espontáneamente de la putrefacción, sino que en algún momento los insectos adultos depositaban sus huevos o larvas sobre la materia en descomposición. Casi simultáneamente a estos experimentos se descubrió que, además de los seres vivos cuya visión es accesible de forma directa, existe todo un universo de seres microscópicos, invisibles a nuestros ojos. El descubrimiento de los microorganismos fue realizado por Anton van Leeuwenhoek en el siglo XVII, gracias a los avances ópticos que hicieron posible la aparición de los primeros microscopios. El reconocimiento de toda esta inmensidad de nuevos seres tuvo, y sigue teniendo, un gran impacto en nuestra concepción de la vida, en las formas en que esta puede manifestarse y en la consideración de la importancia relativa de unas especies sobre otras.

Aunque los experimentos de De Redi consiguieron refutar la teoría de la generación espontánea aplicada a pequeños animales y plantas, la idea de que los microorganismos tampoco se generaban de esa forma precisó nuevas pruebas para ser aceptada. En 1769, Lazzaro Spallanzani logró demostrar que el caldo de carne, calentado a una temperatura lo bastante elevada como para matar a los posibles microorganismos que pudieran existir en él y sellado herméticamente después, no permitía la aparición de nuevos microorganismos. Sin embargo, la teoría de la generación espontánea permaneció todavía vigente en gran parte de la sociedad. La razón que se esgrimía era que el sellado de los recipientes impedía la

entrada de aire, algo necesario para que pudieran surgir los microorganismos. No fue hasta la década de 1860 cuando Louis Pasteur, utilizando matraces de cuello alargado y curvado que permitían el paso del aire, pero no de los microorganismos, consiguió demostrar de forma irrefutable que ni siquiera estos nacen espontáneamente de la materia inerte. Toda la vida procede de la vida, pero eso es en el mundo actual. Hemos de precisar que, al menos una vez en su historia, la vida tuvo que surgir de la materia inanimada. Pero eso fue un proceso lento y progresivo, que duró cientos de millones de años y no los pocos días que parecían ser suficientes para la aparición de seres por generación espontánea.

Los experimentos de Pasteur, junto con la síntesis de la urea llevada a cabo por Friedrich Wöhler en 1828, quien mostró por primera vez que las moléculas que forman parte de la vida pueden obtenerse mediante reacciones químicas que no implican la actuación de los seres vivos, lograron frenar la expansión de la hipótesis del vitalismo, que adquirió cierto auge en el siglo XVIII. Este, aunque separado de las ideas de la generación espontánea, proponía que los organismos poseen una fuerza vital que no está sujeta a las leyes fisicoquímicas universales y que explicaría las propiedades tan especiales de la materia viva, algo que recuerda a la idea de la entelequia de Aristóteles y que actualmente sabemos que es totalmente incierto. Posteriormente, los numerosos experimentos de química prebiótica, realizados sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo pasado, han mostrado claramente que hay vías posibles para el paso de la materia inorgánica a la orgánica. Lo que desconocemos es cómo son esas vías exactamente y en qué orden se deben producir para que se produzca la transición entre la química y la biología. La extraordinaria complejidad de los seres vivos puede hacernos caer en la tentación de creer en fuerzas inespecíficas que, en algunos casos, puedan ser denominadas *alma* o *espíritu*. Pero nos estamos olvidando de un ingrediente

fundamental, la evolución biológica, al que daremos paso en el siguiente apartado.

Y entonces llegó Darwin

Además de los ya mencionados experimentos que consiguieron refutar la teoría de la generación espontánea, en el siglo XVIII los estudios sobre la edad de la Tierra ya hablaban de centenares de millones de años, en lugar de los miles deducidos de la interpretación literal de la Biblia. Actualmente sabemos que la Tierra tiene miles de millones de años, pero pasar de unos pocos miles a centenares de millones fue un gran salto que provocó enormes cambios en el pensamiento. Además, los estudios sobre los fósiles y su distribución en los diferentes estratos de las rocas sugerían que había habido momentos en los que se habían producido grandes extinciones de especies y otros en los que había sucedido lo contrario, una explosión de nuevas formas de vida que no existían en los estratos inferiores. Los ingredientes para desarrollar una teoría de la evolución de la vida estaban servidos.

A la vista de las notables diferencias que existían tanto entre especies distintas como entre los individuos de cada una de ellas, lo que faltaba era encontrar un mecanismo que explicara las razones por las que unas especies e individuos lograban predominar sobre otros, llegando a desplazarlos y provocando esa sucesión de especies que se observaba en el registro fósil. En 1809, Jean-Baptiste Lamarck aportó una de las primeras teorías evolutivas, basada en la herencia de los caracteres adquiridos durante la vida de los individuos. El ejemplo clásico para explicar las teorías de Lamarck es el de las jirafas. Estos animales, inicialmente con cuello corto, estirarían el mismo para lograr alcanzar las hojas de los árboles, algo que a lo largo de la vida del animal provocaría que su cuello se fuera haciendo cada vez más largo. Esta característica era

capaz de transmitirse a la descendencia, de modo que el cuello de las jirafas se iría alargando hasta alcanzar una longitud óptima para su modo de vida. Pocos años antes de la muerte de Lamarck, nacería Gregor Mendel, quien introdujo el concepto de *gen* como unidad de la herencia, algo que podría haber desvinculado esta de los caracteres adquiridos durante la vida si entonces se hubiera sabido más sobre cómo se almacenaba la información en estas entidades, cuya base física era desconocida en la época.

Charles Darwin fue contemporáneo de Mendel, aunque no está claro si llegaron a intercambiar sus ideas. La gran genialidad de Darwin fue reunir sus propias observaciones sobre la distribución de especies y fósiles (sobre todo las obtenidas en el famoso viaje del Beagle) y ponerlas en el contexto de las teorías gradualistas de Charles Lyell para los procesos geológicos y de las de Thomas Malthus para la economía, las cuales defendían que el crecimiento más rápido de las poblaciones frente al de los recursos imponía un límite al número de individuos capaces de sobrevivir.

Todo ello le llevó a publicar en 1859 su obra más famosa, *El origen de las especies*, cuya aportación más relevante fue la de establecer cuál era el mecanismo o fuerza que promovía la evolución de las especies. Esta fuerza no es otra que la *selección natural* de las variantes que mejor compiten por los recursos disponibles para la subsistencia. La selección natural actúa sobre la variación existente, favoreciendo que los individuos que mejor se reproducen en un ambiente concreto sean los que dejen más descendientes, de modo que, con el paso del tiempo, lleguen a ser los mayoritarios en las poblaciones. En el ejemplo ya formulado de las jirafas, no se heredaría la mayor longitud del cuello producida por el estiramiento para alcanzar las hojas; en su lugar, de forma natural, habría algunas jirafas con el cuello más largo. Estas se alimentarían mejor y conseguirían reproducirse de forma más eficiente, de modo que pasarían ese carácter, no adquirido en

vida, a sus descendientes. Se heredan las características "escritas" en los genes, aunque entonces no se supiera de qué estaban formados y por qué había diferencias entre ellos.

La evolución opera sobre lo ya construido. Darwin fue muy lejos en sus teorías, hasta llegar a afirmar que toda la vida que existe en la Tierra tiene su origen en una (o unas pocas) formas iniciales que, gracias a la evolución, se fueron diversificando. El resultado es una relación de parentesco entre todos los seres vivos de nuestro planeta, algo muy hermoso, pero que nos hace plantearnos una cuestión de gran trascendencia: si toda la vida que existe en la Tierra tiene un único origen, ¿será esta un fenómeno tan poco común que no habrá ocurrido en ningún otro lugar del universo? Por el momento desconocemos la respuesta. Hay quien piensa que somos producto del azar y quien piensa todo lo contrario, que la aparición de la vida es un imperativo cósmico, una consecuencia inevitable de la evolución del universo. En los próximos capítulos incidiremos con mayor profundidad en estas cuestiones.

Al igual que Lamarck, Darwin desconocía el origen de la variabilidad de los seres vivos. Hoy sabemos que ese origen reside en los cambios que ocurren en el ADN, la molécula en la que se almacenan las propiedades de la vida y las instrucciones para su funcionamiento, lo que conocemos como *información genética*. Los cambios en el ADN pueden ser de pequeña magnitud o involucrar grandes variaciones en el contenido o la disposición de su material. A veces no tienen ninguna trascendencia, pero en otras ocasiones dan lugar a modificaciones en las características observables de los individuos (el denominado *fenotipo*) que pueden condicionar su mayor o menor éxito.

Los cambios en el ADN se denominan globalmente *mutaciones*, las cuales frecuentemente se producen de forma natural a lo largo de la vida. En ocasiones, los cambios implican la actuación de otras entidades biológicas, como los virus o

las bacterias, que son capaces de movilizar fragmentos de material genético entre especies. No es nuestra intención hacer una descripción exhaustiva de los mecanismos evolutivos, pero sí que querríamos incidir en su enorme potencial para crear diversidad biológica, permitir que la vida se adapte a la enorme pluralidad de condiciones ambientales que existen en nuestro planeta y aumentar el grado de complejidad que poseen los sistemas vivos.

Tres buenas razones para creer en extraterrestres

La teoría heliocéntrica consiguió demostrar que la Tierra es un planeta más entre los que componen el sistema solar, mientras que la teoría de la evolución nos mostró que el hombre no es el objetivo último de la evolución de la vida. Esta tiene su causa primera en el azar (esos cambios en el material genético de los que hemos hablado) y está sujeta a múltiples contingencias que condicionan la acción de la selección natural. Todo esto lo que nos muestra es que el ser humano podría no haber surgido nunca, algo inquietante para la especie que se ha creído dueña y señora de todo el universo. Estas dos lecciones de humildad nos llevan de forma casi inmediata a la siguiente reflexión: si la Tierra no es el centro del universo y nosotros no somos los reyes de la creación, ¿por qué no puede haber otras Tierras habitadas por seres similares o diferentes a nosotros?

Como hemos indicado al principio, la única vida que conocemos es la terrestre, pero nos atreveríamos a afirmar que hay fuertes argumentos a favor de la existencia de vida extraterrestre. A modo de aperitivo para lo que viene más adelante, citaremos solo los tres que nos parecen más relevantes:

1. El universo es mucho más grande de lo que predijeron Copérnico, Galileo y los grandes padres de la astronomía

citados al hablar del debate sobre la pluralidad de los mundos. No solo es que existan otras Tierras, sino que existen otros muchos sistemas planetarios similares a nuestro sistema solar y otras muchas galaxias repletas de estrellas, la mayoría con planetas asociados. Aunque el argumento pueda parecer meramente estadístico, con tantos escenarios, ¿cómo es posible que no exista vida en alguno de ellos?

2. La vida es mucho más robusta de lo que pensábamos hace unas décadas. Se han descubierto microorganismos capaces de desarrollar sus funciones vitales en condiciones ambientales que antes considerábamos totalmente incompatibles para la vida. Que existan seres capaces de vivir a más de 100 °C, bajo los hielos de la Antártida o en condiciones de radiación y sequedad extremas (por citar solo algunos ejemplos) ha ampliado enormemente nuestras expectativas de que pueda existir vida en lugares del cosmos diferentes de nuestra Tierra. La dificultad estriba en si sabremos reconocer esa vida que ha surgido y evolucionado en condiciones tan distintas de la vida que conocemos.
3. Algunos de los ingredientes básicos de la vida son comunes en el universo, en los meteoritos, los cometas o las nubes de polvo interestelar. También pueden ser sintetizados en condiciones abióticas en el laboratorio. Parece que el problema del origen de la vida no es la falta de materiales para construir sus estructuras, sino el ensamblaje correcto de los mismos en condiciones que permitan el gran número de interacciones a todos los niveles que existen en los sistemas vivos. Necesitamos una visión más holística de la vida para comprender las grandes transiciones que han hecho posible su emergencia y su evolución en nuestro planeta y, posiblemente, también en otros.

CAPÍTULO 2

Nuestra referencia: la vida en la Tierra

Hace unos 4000 millones de años, en un planeta llamado Tierra, determinadas moléculas se combinaron para formar estructuras particularmente grandes e intrincadas llamadas organismos. El relato de los organismos se llama biología.

YUVAL NOAH HARARI

¿Qué es lo que distingue a un ser vivo?

La Tierra es un planeta lleno de vida. Entender cómo surgió y cuáles son las condiciones que permiten su desarrollo puede ser un ejercicio tremendamente útil para evaluar las posibilidades de su existencia en otros lugares del universo. Aunque es cierto que la vida extraterrestre puede ser muy diferente de la terrestre, dado que esta última es la única que conocemos, es lógico que la tomemos como referencia en nuestros intentos de localizar otras estructuras en el cosmos que también podamos identificar como seres vivos.

En nuestro planeta, la vida se abre paso incluso en lugares que pueden parecer tremendamente inhóspitos, como el interior de las rocas del desierto de Atacama, las aguas ácidas de algunos ríos o las proximidades de las chimeneas volcánicas submarinas. La vida terrestre, además, se manifiesta en una extraordinaria variedad de formas que, a primera vista, no parecen tener mucho que ver entre ellas. Crustáceos, corales, líquenes, insectos, mamíferos, pájaros, árboles, hongos…, todos estos seres conforman una inmensa lista que podría hacerse aún mucho más larga si a ella añadimos todo el inmenso

conjunto de organismos microscópicos que no podemos ver a simple vista y que, sin embargo, superan en número, y probablemente también en diversidad, a los seres macroscópicos. Por si eso fuera poco, existen entidades como los virus o los viroides que no tenemos muy claro si incluirlos o no en la lista, ya que, aunque poseen algunas propiedades que claramente son indicativas de los seres vivos, carecen de otras de las consideradas fundamentales para la vida.

A primera vista, los organismos incluidos en la "lista de la vida" que hemos elaborado parecen ser muy diferentes. Hay algunos, los organismos fotótrofos, que obtienen energía de los fotones de la luz solar. Otros, los quimiótrofos, son capaces de utilizar la energía desprendida en reacciones químicas inorgánicas que ocurren en el ambiente. Y, por último, existe un amplio grupo de seres, los heterótrofos, entre los que nos encontramos los humanos, que nos aprovechamos de la energía que han obtenido otros organismos y que han almacenado en las moléculas que forman sus estructuras corporales. Mientras que la mayoría de los organismos fotótrofos y quimiótrofos tienen la capacidad de utilizar el dióxido de carbono atmosférico como fuente de carbono para construir sus moléculas, los heterótrofos nos vemos forzados a utilizar los componentes de otros seres vivos para elaborar las nuestras. Existen formas de vida que poseen la capacidad de moverse por la tierra, el mar o el aire, pero hay otras que se las arreglan bastante bien quedándose ancladas al suelo. Hay especies con capacidad de razonamiento y otras cuyas acciones se basan solo en instintos o respuestas básicas frente a los cambios en las condiciones ambientales.

Una vez vistas las grandes diferencias en cómo se manifiesta la vida en la Tierra, dejemos volar nuestra imaginación y pensemos en cómo podría manifestarse en otros mundos. ¿Qué tipo de seres podríamos encontrar en un planeta o satélite que presentara características ambientales muy diferentes del nuestro? ¿Seríamos capaces de identificarlos como *vida*?

Existen planetas con dos soles, con diferente número de satélites girando a su alrededor (o con ninguno), con atmósferas muy distintas de la terrestre o que contienen agua líquida solo en el subsuelo, a veces bajo gruesas capas de hielo. Si en uno de esos lugares hubiera vida, lo más probable es que fuera muy diferente de la terrestre, pudiendo llegar al extremo de que fuéramos incapaces de reconocerla. Para hacerlo, lo ideal sería contar con una definición de vida que incluyera las propiedades esenciales que debe tener un sistema —sea este terrestre o extraterrestre— para que lo podamos clasificar como vivo, aunque a día de hoy no existe una universalmente aceptada.

Como las definiciones están basadas más en las similitudes que en las diferencias, es fácil caer en la tentación de intentar definir la vida fijándonos en lo que tienen en común todas las especies que existen. Durante mucho tiempo, gran parte de esas similitudes permanecieron ocultas a nuestra mirada, pues para encontrarlas hay que descender al nivel molecular, algo que técnicamente solo ha sido posible en los dos últimos siglos. Para empezar, todos los seres vivos estamos formados por cuatro macromoléculas principales, que son las proteínas, los lípidos, los glúcidos y los ácidos nucleicos. Estas macromoléculas dan lugar a estructuras corporales que, cuando se analizan en detalle, se observa que siempre están formadas por unas unidades mínimas que son las células, pudiendo haber incluso organismos formados por una única célula. Además, en todas las células ocurren procesos y reacciones químicas que tienen mucho en común. Por último, en todos los seres vivos existe una amplia variedad de interacciones entre sus componentes que determinan la aparición de ciertas propiedades —denominadas *emergentes*— que los dotan de capacidades que no pueden ser deducidas de la suma de las propiedades de los componentes separados.

Las similitudes moleculares entre los seres vivos llegan a un nivel tal que solo pueden explicarse si existe un antepasado común a todos ellos, es decir, si toda la vida terrestre tiene

el mismo origen. Este hecho, que actualmente está totalmente aceptado, es algo que no resulta obvio, dadas las enormes diferencias que existen a nivel macroscópico entre las especies biológicas, las cuales nos podrían haber hecho pensar en múltiples orígenes de la vida. La existencia de un único origen también implica que solo conocemos un ejemplo de vida, algo que dificulta enormemente distinguir sus propiedades esenciales de las que simplemente representan la mejor solución para prosperar en el ambiente de nuestro planeta. Podría ocurrir que algunas de las características presentes en todos los seres vivos terrestres fueran comunes no por ser esenciales, sino simplemente por haber sido heredadas de ese progenitor universal al que denominamos LUCA (último ancestro común universal, o *last universal common ancestor*). Para entender qué es lo esencial de la vida, necesitaríamos poder comparar la vida terrestre con otra vida que tuviera un origen diferente. El resultado de esa comparación sería un hallazgo de gran trascendencia para entender qué es realmente la vida y cuál es su significado en la evolución del universo.

Los elementos y las moléculas de la vida terrestre

Las extraordinarias propiedades que posee la materia viva podrían hacernos pensar que esta contiene "algo" exclusivo. Está claro que ese algo no puede ser un elemento químico particular, ya que no existe ninguno en la tabla periódica que esté presente en la materia viva y no lo esté en la inerte. En lo que sí existen grandes diferencias es en la proporción de los elementos químicos en los dos tipos de materia y en cómo se combinan para dar lugar a moléculas.

Según la teoría del Big Bang, hace unos 13 800 millones de años, el universo, que estaba concentrado en un punto infinitamente pequeño que albergaba toda la materia, explotó para después enfriarse progresivamente a medida que se

expandía. Muy pronto, sobre un minuto después de la explosión, comenzaron a tener lugar las reacciones de nucleosíntesis primordial, que son el resultado de las interacciones entre las partículas que existían entonces en el universo y que darían lugar inicialmente a la formación de los núcleos de los elementos más ligeros, como el hidrógeno, el helio y el litio. Hubo que esperar unos 380 000 años para que la temperatura fuera lo suficientemente baja para que los electrones, mediante el proceso de recombinación, pudieran interaccionar con los núcleos, dando así lugar a los primeros átomos.

Los ocho elementos más abundantes en el conjunto del universo son (ordenados de mayor a menor): hidrógeno, helio, oxígeno, carbono, neón, hierro, nitrógeno y silicio. Es remarcable que los tres bioelementos primarios más abundantes (hidrógeno, oxígeno y carbono) se encuentran también entre los más abundantes en el universo y, de los ocho señalados, solo los dos gases nobles (helio y neón) no forman parte de la materia viva. Esto último no es extraño, dado que los gases nobles no se combinan con otros elementos y la vida requiere una inmensa variedad de moléculas que se originan gracias a la combinación de unos elementos con otros. Solo gracias a esa variedad molecular la vida puede realizar todas las reacciones químicas que requiere para su funcionamiento.

Prestemos especial atención al carbono. Debido a su gran poder de combinación, este es el elemento base para formar las moléculas biológicas. Sin entrar en demasiadas profundidades químicas, el átomo de carbono posee cuatro electrones desapareados en su capa más externa, lo que le capacita para formar cuatro enlaces covalentes, con él mismo o con otros átomos que también tengan electrones desapareados. La química del carbono con el carbono mismo, el hidrógeno, el nitrógeno y el oxígeno (además de con otros átomos en menor proporción) da lugar a la materia orgánica, la materia que forma, o en algún momento formó, parte de la vida.

Una pregunta frecuente cuando se habla de los elementos de la vida es si, dado que el silicio pertenece al mismo grupo de la tabla periódica que el carbono y puede formar también cuatro enlaces covalentes, no podría existir vida extraterrestre basada en este elemento. La pregunta está bien fundamentada, ya que, aunque el carbono es mucho más abundante en el universo que el silicio, en un planeta similar a la Tierra, el silicio sería más abundante en la corteza. La respuesta es que, al menos por lo que sabemos de nuestro planeta, el silicio juega un papel fundamental en el mundo mineral (recordemos que gran parte de las rocas de nuestro planeta son silicatos), pero no parece el elemento más adecuado para dar lugar a la gran diversidad estructural y funcional de moléculas que requiere la vida.

La química del silicio es mucho más limitada que la del carbono debido a que los enlaces entre dos átomos de silicio o de este con el hidrógeno son más inestables que los que forma el carbono, por lo cual las moléculas basadas en el silicio serían mucho más fácilmente destruibles. Por otro lado, la unión del silicio con el oxígeno adolece de lo contrario, es demasiado estable y con escasa reactividad química, lo que dificulta la creación de grupos funcionales que son fundamentales para la actividad de las moléculas biológicas. De hecho, en nuestro planeta la unión del silicio al oxígeno da lugar a la sílice, el cuarzo, los silicatos o las siliconas, compuestos todos ellos demasiado estables para dar lugar a la plasticidad que requiere la vida. Sin embargo, no debemos olvidar que las variables ambientales también influyen en la estabilidad y funcionalidad de las moléculas, por lo que no es absolutamente descartable que en otros lugares del cosmos pudiera darse un tipo de vida muy simple basada en el silicio. Y decimos muy simple, porque hasta el momento no se han identificado las condiciones ambientales que pudieran dotar al silicio de una capacidad de combinación similar a la del carbono.

Las moléculas que forman parte de los seres vivos terrestres se pueden clasificar en cuatro grandes grupos —glúcidos, proteínas, ácidos nucleicos y lípidos—, cada uno de los cuales incluye un vastísimo conjunto de moléculas diferentes. La función principal de los glúcidos es proporcionar energía. Sus componentes más simples son los monosacáridos, de los cuales la glucosa es quizás el ejemplo más conocido. La función fundamental de los lípidos es el almacenamiento de energía, aunque existe un tipo de lípidos, los fosfolípidos, que son esenciales para la formación de las membranas celulares.

Las proteínas son un diverso grupo de macromoléculas formadas por unas unidades básicas, denominadas *aminoácidos*, que se enlazan entre sí formando largas cadenas. Cuando una proteína se introduce en un solvente acuoso, como es el medio interno celular, se pliega en una estructura tridimensional, generándose superficies y estructuras (los denominados *centros activos*) en las cuales pueden interaccionar otras moléculas, facilitándose así las reacciones químicas entre ellas. Por eso se dice que las proteínas son los catalizadores biológicos.

Por último, los ácidos nucleicos son las moléculas encargadas del almacenamiento de la información genética, es decir, de las características distintivas de cada ser vivo y de las instrucciones para su funcionamiento. Pueden ser de dos tipos: el ácido desoxirribonucleico o ADN, que contiene la información genética celular, y el ácido ribonucleico o ARN que interviene en su procesamiento, pudiendo también ser utilizado como molécula almacenadora de información en algunos virus. Ambos están formados por la unión de nucleótidos: adenina (A), timina (T), citosina (C), guanina (G) y uracilo (U). El ADN no contiene U, mientras que el ARN no contiene T. Además, el ADN posee una estructura en doble hélice, formada por dos cadenas entrelazadas entre sí, mientras que el ARN está formado por cadenas sencillas. El orden en el que se disponen los nucleótidos en el ADN es el que determina la información contenida en su molécula. A nivel

químico, eso implica que la secuencia de cada tres nucleótidos en el ADN, lo que se conoce como *tripletes* o *codones*, va a dar lugar a la incorporación de un aminoácido concreto en la proteína que se esté sintetizando utilizando como base esa información. Esa correspondencia entre tripletes y aminoácidos es lo que se denomina *código genético* y es universal en todos los seres vivos.

Solo con examinar las biomoléculas que forman los seres vivos terrestres y la forma en que se organizan, ya podemos comenzar a sospechar que todos ellos tienen un origen común. Hay parecidos que son extraordinariamente asombrosos, como el mencionado código genético o el hecho de que, de los cientos de aminoácidos que pueden existir en la naturaleza, la vida haya escogido que sean siempre los mismos veinte los que se combinan para formar las proteínas.

La homoquiralidad de las proteínas y los ácidos nucleicos es otro hecho que también se esgrime frecuentemente para apoyar la existencia de un ancestro común. Tanto los aminoácidos que forman las proteínas como los azúcares que forman los nucleótidos son compuestos quirales, es decir, que pueden existir en dos conformaciones espaciales distintas, no superponibles, que usualmente se denominan L y D. En general, tanto las reacciones de síntesis química de los aminoácidos como las de los azúcares producen mezclas racémicas, es decir, que están formadas por cantidades similares de las formas L y D. Sin embargo, los aminoácidos que forman parte de las proteínas siempre están en la forma L, mientras que los azúcares que dan lugar a los nucleótidos de los ácidos nucleicos lo están en la D.

Las propiedades esenciales de la vida

La existencia de un antepasado común, LUCA, a todas las formas de vida terrestre nos muestra que la caracterización

de las moléculas que componen los seres vivos, así como la forma en que estas se organizan y funcionan, puede ser una aproximación válida para definir la vida terrestre, pero no para definir la vida en un sentido amplio, incluyendo otros modos en que pudiera presentarse fuera de nuestro planeta. Por ello, algunos científicos proponen que hay que dejar de pensar en la vida en términos de sus manifestaciones concretas (animales, plantas, ácidos nucleicos, proteínas…) y pasar a hacerlo en término de las acciones que tiene que llevar a cabo. Dicho de otro modo, debemos intentar identificar los procesos universales que deben estar presentes en la vida, sea esta terrestre, marciana o del más remoto planeta extrasolar. Cuando pensamos en estos procesos, nos vienen a la mente cinco fundamentales, aunque eso no quiere decir que no existan entidades, como los virus o los viroides, que se sitúen en zonas grises, en las que algunos de ellos están ausentes o no se manifiestan de forma bien definida. Los procesos a los que nos referimos son:

1. *Generación de orden.* Existe un principio que todos conocemos y que, en cierto modo, gobierna el comportamiento del universo. Este es el segundo principio de la termodinámica, que nos dice que la entropía de un sistema siempre tiende a aumentar. Pero ¿qué es eso de la entropía? En muchas ocasiones este concepto se visualiza como el grado de desorden de un sistema. A todos nos resulta sencillo entender que es mucho más fácil mantener un sistema desordenado que ordenado según cierto criterio. Por eso no nos suena raro eso de que, de forma natural, todo tiende al desorden. De forma más precisa, la entropía puede definirse como el número de estados en que puede existir un sistema sin que se modifiquen sus propiedades esenciales. No hay contradicción entre ambas formas de entender el concepto, ya que el desorden siempre admite muchos más estados que el orden.

Los seres vivos parecen contradecir esa tendencia al desorden, ya que todos presentan un elevado grado de organización

que se manifiesta en el gran número de interacciones a todos los niveles que tienen lugar en ellos y que determinan su funcionamiento. Veamos algunos ejemplos. Una solución de aminoácidos no es capaz de realizar ninguna función, mientras que esos mismos aminoácidos, cuando forman parte de una proteína, son capaces de catalizar una reacción química concreta. Esa nueva función, la catálisis, ha emergido como consecuencia de las interacciones que se establecen entre los aminoácidos cuando la proteína adquiere un plegamiento concreto. Sigamos con las proteínas. Estas no se sintetizan todas a la vez ni se localizan sin ningún criterio dentro de la célula. En su lugar, existe un orden, dictado por las señales que se reciben tanto del medio interno como del externo a la célula, que marca cuándo y dónde es necesario que se produzca una proteína u otra. Si continuamos ascendiendo en la escala biológica, vemos que las células interaccionan entre ellas para dar lugar a tejidos y órganos, que tienen propiedades funcionales que no serían posibles en las células aisladas. Todos los órganos de un organismo complejo también tienen que interaccionar para actuar de forma coordinada, de modo que puedan emerger funciones complejas como el movimiento, la percepción sensorial del mundo o el pensamiento. Las interacciones dentro de los organismos se extienden incluso a las que ocurren con las bacterias y virus que existen en su interior. Por último, hay interacciones a escala global entre las poblaciones y los ecosistemas que son determinantes para el funcionamiento de toda la biosfera. ¿Cómo se las apaña la vida para mantener este orden? La respuesta está en la extracción de energía del ambiente, que es transformada en su provecho, y eso nos lleva a la segunda propiedad esencial de la vida, que es el metabolismo.

2. *Metabolismo*. Puede definirse como la transformación de la materia y la energía del medio externo en materia y energía utilizables por la vida para mantener su elevado grado de

orden interno. El metabolismo requiere la realización de un número elevado de reacciones químicas, cada una de ellas catalizada por proteínas específicas (enzimas, utilizando la nomenclatura bioquímica). Esto implica que, dentro de la célula, debe existir un orden temporal y espacial que impida que esas reacciones se realicen al azar. Podríamos decir que necesitamos orden para mantener el orden. Pero ¿por qué la vida se empeña tanto en mantener el orden si ya hemos visto que eso parece ir en contra de las leyes de la física? Hay explicaciones que lo que postulan es que, a pesar de ser sistemas altamente ordenados, en realidad los seres vivos contribuyen a aumentar el desorden total del universo. Veamos esto con un poco más de detalle.

En el universo, la energía está muy concentrada en puntos muy concretos, de los cuales quizás el ejemplo más claro sean las estrellas. Una buena parte de la vida que existe en la Tierra utiliza esta energía para hacer la fotosíntesis y crear energía química que almacena en sus moléculas y que es transferida a lo largo de la cadena alimenticia desde los productores primarios hasta los distintos tipos de consumidores, para acabar en los descomponedores, los seres vivos cuya principal fuente de sustento es la materia orgánica en estado de descomposición. En todos estos trasvases de energía entre organismos siempre hay una parte de la misma que se pierde en forma de calor. En otras palabras, la energía se dispersa gracias a los procesos que ocurren en los seres vivos y eso hace que aumente la entropía del sistema global, ya que la dispersión ofrece más grados de libertad que la concentración y, por tanto, es compatible con un mayor número de estados. En este esquema, los seres vivos se comportarían como sistemas abiertos que actuarían como canalizadores de la entropía, de modo que, aunque la disminuyan de forma localizada y temporal (hasta la muerte del individuo), contribuyen a que esta aumente de forma global, considerando la entropía de los seres vivos más la de su entorno.

Podemos imaginar que, en otros lugares del cosmos, esa tendencia a aumentar el desorden también podría ser facilitada por la vida utilizando otras fuentes de energía. Igual que en la Tierra han podido surgir seres que mediante un complejo sistema de reacciones han logrado transformar la energía de los fotones del sol en energía química, en otros lugares del universo podría haber seres diferentes que utilicen otras fuentes de energía. Eso, lógicamente implicaría secuencias de reacciones químicas muy distintas de las que utiliza la vida terrestre y el uso de catalizadores que quizás seamos incapaces de imaginar.

3. *Información.* Para que el metabolismo pueda funcionar de forma adecuada es necesario que cada célula contenga información sobre cómo realizarlo. Esa información, además, debe ser heredable, para lo cual en algún momento tiene que copiarse. Entre otras cosas, la vida utiliza información para saber cuándo tiene que funcionar cada reacción metabólica, cómo sintetizar sus componentes o cómo se tiene que producir el desarrollo embrionario para que a partir de una única célula pueda llegar a producirse un organismo complejo. Al igual que el metabolismo precisa un orden en su realización para mantener el orden inherente a los sistemas vivos, la información también necesita información para saber cuándo y cómo tiene que ser interpretada. Podríamos pensar en la información genética como un libro de instrucciones que, dependiendo de las circunstancias del ambiente, omite unos párrafos u otros y guía nuestra atención de forma selectiva. Solo así, el mismo libro de instrucciones puede lograr que en una célula ocurran procesos distintos dependiendo de las circunstancias de cada momento o que en los organismos complejos cada tipo celular realice funciones diferentes, a pesar de que la información contenida en ellos sea la misma.

4. *Evolución.* A pesar de nuestra insistencia en las propiedades comunes que tenemos todos los seres vivos terrestres, no es

menos cierto que también poseemos notables diferencias que se deben a que no todos contenemos la misma información, es decir, nuestro ADN no es el mismo. ¿Cómo es eso posible si todos procedemos de un antepasado común que poseía una información genética concreta? La respuesta está en que la información puede cambiar con el tiempo, dando lugar a individuos que no son iguales. Cuando las diferencias se acumulan, pueden hacerse tan grandes que lleguen a surgir nuevas especies. Este proceso de cambio es la evolución biológica. Su actuación, a lo largo de miles de millones de años, ha hecho posible que, a partir de un ancestro común, se haya producido el inmenso número actual de especies, además de todas las que ya se han extinguido. Gracias a la evolución, la vida no solo se ha diversificado para conquistar prácticamente todos los lugares de nuestro planeta, sino que también ha ido ganando en complejidad.

Como hemos indicado, la evolución tiene su origen en los cambios heredables que ocurren en el material genético y que se denominan *mutaciones*. Algunas tienen su origen en la exposición a ciertas condiciones ambientales —la luz ultravioleta del sol quizás sea el ejemplo más conocido a nivel popular— o son el resultado de algunas reacciones químicas que ocurren de manera normal en el interior celular. Pero la mayoría de las mutaciones se producen como consecuencia de la imperfección del proceso de copia (o replicación) del ADN, algo que tiene que ocurrir cada vez que una célula se divide. Si ese proceso fuera perfecto y las moléculas de ADN copiadas fueran exactamente iguales a sus progenitoras, la vida habría sido incapaz de adaptarse a los cambios que inevitablemente suceden en el medio y se habría extinguido rápidamente. Sin embargo, gracias a los errores de copia del ADN, la información genética cambia y, como consecuencia, también lo hacen las características de los individuos portadores de esa información. El resultado es que se generan poblaciones heterogéneas en las que los individuos difieren

en su grado de adaptación al ambiente y, por tanto, en su capacidad para competir por los recursos y su éxito reproductivo. La selección natural es una potente fuerza que actúa sobre esa diversidad, favoreciendo que los individuos con características más favorables lleguen a estar más representados.

Podemos visualizar la selección natural como un potente filtro que elimina lo peor y favorece lo mejor, pero resulta que los individuos mejor adaptados a unas condiciones pueden estarlo peor a otras, lo que significa que la evolución no tiene un fin predeterminado, sino que su resultado va a depender de las circunstancias ambientales, algo que no podemos controlar y que, a lo largo de la historia, ha sido determinante para conformar el tipo de vida que existe en nuestro planeta.

Cuando poblaciones de la misma especie se desarrollan en ambientes en los que operan presiones selectivas diferentes, pueden evolucionar de forma muy distinta, ya que la selección natural favorecerá a diferentes individuos en cada caso. Si, además, estas poblaciones están aisladas y no pueden mezclarse entre ellas, podrá llegarse a un punto en el que se formen especies diferentes, que serán incompatibles desde un punto de vista reproductor. Esta combinación de aislamiento reproductivo y actuación de presiones selectivas distintas es lo que ha conducido al enorme grado de diversificación de la biosfera actual.

La combinación de los procesos de mutación, competición entre individuos y selección natural de los más adaptados es la esencia de las teorías de Darwin, según las cuales la evolución es un proceso lento que ocurre gracias a la acumulación gradual de cambios de pequeño efecto. Sin embargo, actualmente sabemos que los cambios en el material genético pueden tener un alcance mucho mayor. Si nos vamos al mundo de los microorganismos, encontramos que estos poseen un aliado evolutivo muy poderoso representado por los mecanismos de transferencia horizontal de genes, que permiten el intercambio de grandes fragmentos de material genético

entre individuos de la misma especie o incluso de especies diferentes. De este modo, las innovaciones evolutivas que surgen en un individuo pueden ser compartidas rápidamente por toda la comunidad. Este proceso de compartición de información genética pudo ser esencial en el propio origen de la vida, ya que las poblaciones formadas por ese ancestro común podrían, en realidad, estar formadas por células distintas que intercambiaran genes entre ellas. Eso significaría que la supervivencia del conjunto se aseguraba gracias a la cooperación entre sus integrantes. La cooperación es algo que a lo largo de la evolución ha ido adquiriendo cada vez mayor relevancia, hasta llegar a una biosfera en la que, en mayor o menor grado, todas las especies están relacionadas entre sí formando una inmensa red de interacciones.

5. *Compartimentación*. La última propiedad esencial de la vida que mencionaremos es la necesidad de la existencia de una barrera que delimite dónde empieza y dónde acaba el ser vivo, es decir, que delimite un compartimento. Esto es algo fundamental para que los componentes de la vida no se diluyan en el medio y puedan funcionar de forma concertada, de modo que las reacciones químicas del metabolismo, así como los procesos de copia y procesamiento de la información, puedan tener lugar. La barrera que delimita los compartimentos de la vida no debe aislarlos totalmente, pues, como hemos mencionado al hablar del metabolismo, los seres vivos son sistemas abiertos que intercambian materia y energía con el medio, de modo que el resultado final de esos intercambios sea un aumento de la entropía del sistema global. Además, la barrera debe ser capaz de trasladar información del exterior al interior, de modo que la vida pueda ajustar su funcionamiento a los cambios que se producen en el ambiente. Estas barreras tan especiales son las membranas plasmáticas, y el conjunto de la membrana más el contenido delimitado por ella es lo que se denomina *célula*.

Las células son las unidades mínimas de vida y, de hecho, hay organismos, los unicelulares, que están formados por una única célula. Aunque los organismos pluricelulares tenemos mucha más masa que los unicelulares, si atendemos al número de individuos, la biosfera terrestre está formada principalmente por seres unicelulares, algo que deberíamos tener presente cuando pensemos en el tipo de vida que esperamos encontrar en otros planetas.

¿Quiere decir lo que hemos expuesto que cualquier tipo de vida que encontremos tiene que estar organizada en células similares a las que existen en la vida terrestre? Nuevamente, nuestra respuesta es que no. La propiedad esencial de la vida que estamos resaltando es la compartimentación, pero esta no tiene por qué conseguirse a través de células similares a las que conocemos. De hecho, la membrana plasmática es una estructura muy compleja que es difícil que pueda surgir de forma rápida, por lo que hay que pensar que las primeras membranas serían estructuras mucho más simples que las actuales. Incluso se piensa que los primeros compartimentos que proporcionaron esa función de concentrar y aislar del medio los componentes de la vida pudieron ser minúsculas cavidades sobre superficies minerales. Obviamente, esos compartimentos primitivos no ofrecían todas las posibilidades que aportan las membranas actuales, pero es que la vida en esas épocas primitivas también sería mucho más simple y no necesitaría el elevado grado de regulación que necesita la actual.

La historia de la vida en la Tierra

La Tierra se formó hace unos 4540 millones de años, gracias a la acumulación de material procedente de otros cuerpos más pequeños, conocidos como *planetesimales*. Los inicios de nuestro planeta estuvieron marcados por un intenso bombardeo meteorítico que tuvo su mayor intensidad durante los

primeros 100 millones de años. Según la hipótesis más aceptada, fue entonces cuando la Tierra colisionó con un objeto del tamaño de Marte, dando lugar a la formación de la Luna. El calor de los impactos dejó la superficie terrestre en estado fundido. Sin embargo, el enfriamiento fue muy rápido y se piensa que hace unos 4400 millones de años ya se había formado una corteza sólida.

La atmósfera primitiva se generó gracias a los gases que escapaban de esa corteza, además de los emitidos por los volcanes. Su composición probablemente incluía nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua, junto con pequeñas cantidades de hidrógeno, monóxido de carbono, metano y una proporción insignificante de oxígeno. La condensación del vapor de agua atmosférico contribuyó a la formación de los primeros océanos hace unos 4200 millones de años, comenzándose así ya a dibujar un escenario favorable para la vida. Sin embargo, entre hace 4100 y 3800 millones de años tuvo lugar otra oleada de impactos tremendamente destructiva (el bombardeo meteorítico tardío), que probablemente destruyó cualquier intento de vida anterior. Solo cuando los impactos se hicieron menos frecuentes, las condiciones en la Tierra comenzaron a ser favorables para la vida de forma estable.

Los impactos de los cometas y los asteroides trajeron a la Tierra ingredientes muy valiosos para la vida, entre ellos agua y pequeñas moléculas orgánicas. El inventario de moléculas orgánicas detectadas en el espacio interestelar incluye al menos 120 especies diferentes, entre las que se incluyen el aminoácido más simple (la glicina) y varios precursores de diversas reacciones químicas en las que es posible sintetizar muchos de los componentes básicos de la vida. El fósforo, otro ingrediente fundamental, probablemente llegó a bordo de meteoritos. Vemos, por tanto, que la hipótesis de la panspermia no es tan desacertada, al menos cuando se entiende como esta llegada de materia básica de la vida a la Tierra.

Hace 4500 millones de años el Sol emitía un 30% menos luz que en la actualidad y hace 2500 millones de años, un 20% menos. Esto se debe a que, con el tiempo, las estrellas van aumentando su contenido en helio respecto al de hidrógeno. Debido a que la combustión del helio desprende más energía que la del hidrógeno, las estrellas, incluyendo el Sol, aumentan su brillo y temperatura con la edad. A cambio, la proporción de luz ultravioleta es mayor en las estrellas jóvenes, lo que, dada la ausencia de una capa de ozono protectora, podría tener efectos dañinos sobre las primeras moléculas y estructuras biológicas que se estuvieran formando en la Tierra primitiva. Un planeta con la composición atmosférica de la Tierra actual que orbitara alrededor del Sol de hace 4500 millones de años habría tenido temperaturas tan frías que toda el agua de su superficie se habría congelado. Sin embargo, sabemos que la Tierra contiene océanos desde épocas muy remotas, lo que hace pensar que la atmósfera de entonces era más densa y tenía una composición en gases que le permitía ejercer un efecto invernadero mucho más potente que el que provoca la atmósfera actual.

Para saber cuándo surgió la vida en la Tierra, la mejor herramienta de que disponemos es el análisis de las rocas antiguas. Sin embargo, esta aproximación tiene el problema de que, debido a la tectónica de placas y la erosión causada por los agentes físicos externos, los materiales de la corteza terrestre se están reciclando continuamente, de modo que las rocas con una antigüedad de más de 3000 millones de años son muy raras. En esa época la vida microscópica estaba ya bien establecida en la Tierra, lo que significa que todos los procesos anteriores a la generación de las primeras formas de vida terrestre apenas han dejado huella.

Aunque es un tema sujeto a debate, las primeras evidencias fósiles de vida parecen corresponder a rocas de una antigüedad de unos 3500 millones de años procedentes de Sudáfrica, que contienen estructuras con morfologías compatibles

con microfósiles de células individuales o formando filamentos. De la misma época son los estromatolitos (comunidades de microorganismos fosilizados en láminas superpuestas) hallados en la región de Pilbara, en Australia. El hecho de que en épocas tan primitivas ya existieran estructuras tan complejas como las bacterias nos muestra que, a pesar de la falta de certezas sobre el momento exacto del inicio de la vida, este tuvo que ser muy temprano.

Para entender cómo pudo originarse la vida, necesitamos conocer los diferentes ambientes y las fuentes de energía que existían en la Tierra primitiva, así como las materias primas disponibles y las reacciones químicas a las que estas podrían haber dado lugar. Entre los ambientes propicios, los que se consideran más relevantes son los entornos hidrotermales, las aguas de los océanos, las pequeñas concentraciones de agua en charcos o lagos y las interfases agua-roca. Es probable que en cada uno de esos lugares se formara un tipo de compuestos diferentes. Más adelante, el transporte facilitado por los agentes físicos externos podría haber favorecido su mezcla, de modo que en etapas posteriores pudieran reaccionar entre ellos. Así se elimina el problema de que un mismo ambiente quizás no reuniera todas las características necesarias para la síntesis de todos los componentes predecesores de la vida.

Respecto a las fuentes de energía, podrían ser tan variadas como la luz ultravioleta y visible, algunos procesos químicos de oxidación y reducción o el calor geotérmico. Hay que precisar que, debido a que la radiación luminosa no puede penetrar mucho en el agua, solo sería accesible cerca de la superficie de los océanos o en tierra firme, lugares en los que quizás la mayor radiación ultravioleta del sol en esa época podría haber sido un obstáculo para la estabilidad de las moléculas biológicas. La energía geotérmica podría haber sido importante en ambientes hidrotermales, en los que además es frecuente la presencia de compuestos que pueden intervenir en reacciones en las que se libera energía. En el caso de los

océanos primitivos, es probable que estos contuvieran altos niveles de hierro en una forma que podría haber desempeñado un papel importante en las reacciones prebióticas.

Se sabe que los componentes básicos de la vida pueden sintetizarse en las nubes interestelares y los cometas, donde las temperaturas están cercanas al cero absoluto, y también en las cercanías de las fuentes hidrotermales, donde las temperaturas pueden superar los 100 °C. La catálisis de esas primeras reacciones merece una mención aparte. En los organismos actuales, las proteínas con actividad enzimática reducen la energía de activación de las reacciones biológicas, permitiendo que estas tengan lugar a velocidades y temperaturas compatibles con la vida. En la Tierra prebiótica, ninguna de esas proteínas catalíticas habría estado disponible, siendo necesario, por tanto, el uso de otros catalizadores. Entre los más accesibles en esa época se incluyen minerales naturales como las arcillas, los sulfuros o la calcita. El aumento de la concentración de los reactivos químicos, facilitado gracias a procesos como la evaporación o el ordenamiento espacial de sustratos sobre superficies minerales, también podría haber contribuido a acelerar las reacciones prebióticas.

Los pasos hacia el origen de la vida

Sea cual sea el escenario propuesto para el origen de la vida, está claro que lo primero que tuvo que ocurrir fue la síntesis de las unidades simples que constituyen las moléculas más complejas. Los sustratos de esas primeras reacciones probablemente fueron los gases que componían la atmósfera primitiva o quizás moléculas algo más complejas, como las que posiblemente llegaron con el polvo interestelar o a bordo de los meteoritos, asteroides o cometas. El estudio de las reacciones químicas que dan lugar a la formación de moléculas orgánicas, sin la participación de catalizadores biológicos, constituye lo que se denomina *química prebiótica.* El primer

experimento de química prebiótica enfocado a entender el origen de la vida fue realizado por Stanley Miller y Harold Urey en 1953. Ambos introdujeron en una cámara los gases que entonces se creía que formaban la atmósfera de la Tierra primitiva: metano, amoniaco, vapor de agua e hidrógeno. Después de aplicar energía mediante descargas eléctricas que emulaban los rayos de las tormentas, los gases reaccionaron entre sí, dando lugar a un producto que, cuando se analizó, se vio que contenía aminoácidos, algunos azúcares y varias bases nitrogenadas, confirmando así algo que ya había demostrado Friedrich Wöhler cuando sintetizó la urea en 1828 y es que la síntesis de los componentes que forman parte de los seres vivos puede tener lugar en condiciones abióticas.

Desde el experimento de Miller-Urey se han introducido numerosas variaciones en las reacciones de química prebiótica. Se han modificado los sustratos, se han introducido diferentes catalizadores inorgánicos y se han utilizado otras fuentes de energía. La conclusión es que la mayoría de las moléculas orgánicas más básicas pueden sintetizarse en ambientes prebióticos. El problema es generar de forma simultánea todos los componentes necesarios para que pueda surgir la vida. Como se ha indicado, la idea más aceptada es que probablemente existieron múltiples vías de síntesis de compuestos diferentes, operando en distintos lugares y momentos. Posteriormente, los productos obtenidos habrían reaccionado entre ellos hasta formar todos los ingredientes de la vida. Para que esto sea posible, los compuestos sintetizados deben permanecer estables durante largos periodos de tiempo, hasta que tuvieran la oportunidad de intervenir en nuevas reacciones.

Respecto a la generación de moléculas más complejas (o polímeros) a partir de los monómeros o unidades más simples, diversos estudios han demostrado que los aminoácidos pueden polimerizar aleatoriamente para dar lugar a pequeños péptidos. Los nucleótidos también pueden ensamblarse en cadenas cortas de ácidos nucleicos. Sin embargo, la síntesis

de proteínas o cadenas de ácidos nucleicos más largas, algo esencial para la emergencia del metabolismo y la información genética, es algo que no está resuelto. En el mundo actual esos procesos tienen lugar gracias a los sistemas de copia y traducción de la información, que son tremendamente complejos y no estaban accesibles en esas épocas primitivas.

En las células actuales, el ADN actúa como molécula almacenadora de la información necesaria para la síntesis de las proteínas, mientras que estas realizan las actividades catalíticas, incluyendo la catálisis de la copia del ADN. Este planteamiento conduce a una intrigante paradoja: si el ADN se originó primero, ¿cómo se replicó sin proteínas?; pero si fueron las proteínas las que se surgieron primero, ¿cómo se codificó su secuencia de aminoácidos para que esta información no se perdiera? El modelo del mundo del ARN propone como solución a este problema que, en épocas primitivas, el ARN actuó simultáneamente como molécula almacenadora de la información genética y como molécula catalítica. Que el ARN puede ser utilizado para almacenar información es evidente, dado que existen muchos virus que tienen un genoma formado por ARN. Por otro lado, existen muchas moléculas de ARN, las denominadas *ribozimas*, que pueden llevar a cabo funciones catalíticas. Esto sucede porque las moléculas de ARN están formadas por cadenas sencillas de nucleótidos que, al igual que las proteínas, pueden plegarse dando lugar a estructuras que facilitan la interacción de sustratos y la catálisis entre ellos. Por tanto, es factible imaginar una célula primitiva o protocélula en la que la información genética estuviera codificada por ARN y las funciones fueran llevadas a cabo por ribozimas.

La hipótesis del mundo del ARN no está exenta de críticas derivadas de la inestabilidad de la molécula, la dificultad para que aparecieran las primeras ribozimas en ausencia de catalizadores capaces de sintetizar ARN largo y funcional o el hecho de que, hasta el momento, no se haya encontrado

ninguna molécula de ARN capaz de copiarse a sí misma. La idea imperante actualmente, que no resuelve todas las críticas anteriores, es que las actividades catalíticas del ARN podrían haber sido complementadas por otras moléculas, como pequeños péptidos o minerales arcillosos.

A veces, la investigación sobre el origen de la vida se plantea como un debate sobre qué surgió primero, si el metabolismo o la información. En realidad, el metabolismo necesita información para poder ser mantenido en el tiempo y la información requiere energía para poder ser procesada. Por tanto, parece claro que, antes de que surgieran las primeras células, ambos procesos debieron de integrarse, para lo cual la emergencia de los compartimentos fue algo esencial. El origen prebiótico de la membrana lipídica no está totalmente claro. Sin embargo, dado que las moléculas de ácidos grasos son capaces de autoorganizarse espontáneamente formando estructuras esféricas o vesículas, se cree que este proceso es el que pudo dar lugar a las primeras membranas. Las vesículas así formadas pueden crecer, dividirse y captar de forma selectiva compuestos del ambiente. Quizás en algún momento estos compuestos fueron los que iniciaron el primer metabolismo y almacenaron la primera información genética, probablemente en pequeñas moléculas de ARN.

En este punto, ya solo nos faltaría un ingrediente fundamental para la vida que no es otro que la evolución biológica, que surgiría cuando alguna de las vesículas de las que hemos hablado portara alguna característica ventajosa que favoreciera su reproducción y permanencia sobre el resto, para lo cual previamente habría sido necesario que el proceso de replicación del ARN se acoplara a la división de las vesículas, de modo que la información genética no se perdiera.

El tema del origen de la vida sigue siendo un área de investigación activa. El enfoque de la biología sintética, también denominado *de abajo arriba* permite comprender las posibles rutas de ensamblaje de sistemas biológicos complejos a partir

de precursores más simples. La otra aproximación al origen de la vida es la conocida como *de arriba abajo* y consiste en la comparación de las características de los seres vivos para intentar inferir qué genes estaban ya presentes en LUCA.

El árbol de la vida

Cuando se estudian los vínculos que existen entre los seres vivos, estos a menudo suelen organizarse en un diagrama en forma de árbol que nos permite comprender las relaciones evolutivas entre ellos. El lugar más profundo de ese árbol, en el que todas las ramas confluyen, es donde se situaría LUCA. Hasta llegar ahí tuvieron que darse todos los procesos que hemos detallado y que quizás nunca lleguemos a conocer de forma precisa. Puede que haya habido otras aproximaciones hacia la vida anteriores a LUCA, pero no han dejado descendencia ni signos de su paso.

El árbol de la vida nos muestra que, en la Tierra, esta se divide en tres dominios: arqueas, bacterias y eucariotas. En algunas representaciones más modernas del árbol solo se consideran dos dominios, arqueas y bacterias, siendo los eucariotas una rama que deriva del dominio arquea. Los organismos unicelulares son comunes en los tres dominios, y todas las arqueas y bacterias son unicelulares. Solo en el dominio de los eucariotas hay seres pluricelulares. El término *procariotas* (que engloba las bacterias y las arqueas) se ha utilizado tradicionalmente para describir organismos unicelulares que no contienen un núcleo diferenciado donde se incluye su material genético, algo que sí poseen los eucariotas.

Los primeros organismos unicelulares probablemente eran anaerobios (vivían en ambientes sin oxígeno), heterótofros (se alimentaban de materia orgánica) y procariotas. Estos primeros microorganismos, que no han dejado rastro, pudieron vivir hace unos 3800 millones de años. Pronto debieron de evolucionar hacia un metabolismo autótrofo en el que la

energía era obtenida a partir de reacciones químicas o de la luz solar. Los primeros fósiles encontrados, con unos 3500 millones de años, serían sus descendientes. ¿Realizaban ya la fotosíntesis oxigénica esas bacterias que formaron los estromatolitos de Pilbara o utilizaban otro tipo de metabolismo? Lo cierto es que no lo sabemos, ya que el oxígeno producido inicialmente por las cianobacterias (las primeras bacterias fotosintéticas) fue utilizado para oxidar el abundante hierro reducido que existía entonces en los océanos, dando lugar a las formaciones de hierro bandeado. Existen estructuras de este tipo con edades que abarcan desde 3760 hasta 2000 millones de años, época en la que en los océanos no quedó más hierro disuelto que pudiera oxidarse. Entonces, el oxígeno comenzó a acumularse en la atmósfera, iniciándose la formación de la capa de ozono. Este hecho determinó que la cantidad de radiación ultravioleta que alcanzaba la superficie terrestre fuera cada vez menor, aumentando así sus condiciones de habitabilidad.

El oxígeno atmosférico, por su gran capacidad oxidante, representó un gran peligro para la vida que existía en esa época, que era mayoritariamente anaerobia. Sin embargo, la que consiguió adaptar su metabolismo y hacerlo aerobio obtuvo una gran ventaja, ya que el oxígeno es capaz de oxidar totalmente la materia orgánica, lo que supone que el rendimiento energético que se obtiene es mucho mayor. Este hecho, unido a la aparición de las células eucarióticas hace unos 1500-2000 millones de años, facilitó que la vida pudiera adquirir cada vez mayor complejidad. Las células eucarióticas surgieron gracias a eventos de simbiosis que facilitaron la cooperación entre diversos tipos celulares. Así surgieron las mitocondrias, unos orgánulos que son muy eficientes en la obtención de energía y los cloroplastos, encargados de realizar la fotosíntesis en los vegetales.

Poco después de la aparición de las células eucariotas aparecieron los primeros organismos pluricelulares, lo que

llevó a la aparición de tipos celulares que realizan funciones distintas dentro del mismo organismo. Este hecho requiere que en cada tipo celular se exprese un subconjunto de genes y se reprima el resto, para lo cual es necesario que previamente hayan surgido mecanismos señalizadores de la expresión génica. Los primeros animales (o precursores de estos) están representados por la fauna de Ediacara, que incluye más de cien especies formadas por tejidos blandos. Algunas eran parecidas a medusas o gusanos y otras muestran escasa relación con los animales modernos, por lo que probablemente representan especies extinguidas. Finalmente, en esta breve revisión sobre la vida, nos gustaría destacar que hace 540 millones de años tuvo lugar la explosión cámbrica, asociada al rápido desarrollo de animales complejos con partes duras. Se originaron así la mayor parte de los diseños adaptativos básicos que, con numerosas variaciones, se han mantenido vigentes hasta ahora.

Finalmente, para concluir este capítulo, nos gustaría resaltar que la mayor parte de la vida en la Tierra es microscópica. Es lógico que, por su mayor simplicidad, fuera la que surgiera en las etapas iniciales, permaneciendo sobre nuestro planeta a lo largo de toda su historia. Sin embargo, que esa aparente simplicidad no nos engañe, ya que los microorganismos están mucho mejor adaptados que la vida compleja para desarrollarse en condiciones extremas y cambiantes. Como tantas veces se dice, si ocurriera un desastre global en nuestro planeta, la vida que más tiempo sobreviviría sería la microscópica. Por todas estas razones, la mayor parte de los astrobiólogos consideramos que la vida que tiene más probabilidades de ser encontrada en el universo será similar a las bacterias terrestres. La vida compleja tarda mucho más tiempo en aparecer y, al menos en la Tierra, no solo no ha conseguido desplazar a la vida microscópica, sino que depende en gran parte de ella.

CAPÍTULO 3

¿Qué es lo que hace a un planeta habitable?

Existen, pues, innumerables soles; existen infinitas tierras que giran igualmente en torno a dichos soles, del mismo modo que vemos a estos siete (planetas) girar en torno a este sol que está cerca de nosotros.

GIORDANO BRUNO

Los escenarios posibles para la vida

Durante gran parte de la historia, nuestro conocimiento del universo se limitó al sistema solar, dentro del cual se consideraba que la Tierra era un planeta especial, tanto por su posición como por su capacidad para sostener la vida. Durante el Renacimiento, la revolución copernicana sentó las bases de la teoría heliocéntrica y pronto alimentó la idea de que muchas de las estrellas que vemos en el firmamento podrían ser el centro de otros sistemas solares similares al nuestro. Ya en el siglo XX, los estudios sobre la formación estelar y de planetas llevaron al convencimiento casi generalizado de la existencia de planetas que orbitan alrededor de estrellas diferentes de nuestro sol. Sin embargo, no fue hasta finales de siglo cuando los avances tecnológicos permitieron su detección.

Un planeta extrasolar, o exoplaneta, es cualquier planeta situado fuera del sistema solar. La mayoría orbita alrededor de otras estrellas, pero también hay exoplanetas que orbitan alrededor del centro de nuestra galaxia, sin estar asociados a ninguna estrella. Los primeros exoplanetas fueron identificados en los años noventa y, desde entonces, se han descubierto

más de 5000 utilizando una amplia variedad de técnicas de detección que detallaremos más adelante. Y esto es solo el principio, ya que solo hemos explorado una minúscula parte del universo. Se estima que nuestra galaxia, la Vía Láctea, contiene entre 100 000 y 400 000 millones de estrellas. Si cada una de ellas tuviera un sistema de planetas, su número podría acercarse al billón.

Considerando que la Vía Láctea es solo una de las aproximadamente 100 000 millones de galaxias que existen en el universo, haciendo un simple cálculo es fácil darse cuenta de que el número de posibles planetas extrasolares podría superar las decenas o cientos de miles de trillones, una cifra casi imposible de imaginar por la mente humana. Y eso, sin contar que muchos de esos planetas también podrían tener sus propias lunas girando a su alrededor. Esto hace que el argumento estadístico a favor de la posible vida extraterrestre sea muy potente. Incluso, aunque la vida necesitara un planeta casi igual a la Tierra para poder surgir y mantenerse, ¿quién se atrevería a decir que ese planeta no existe, habiendo como hay tantos mundos en el universo? En su libro *Breve historia del tiempo*, publicado en 1988, Stephen Hawking decía: "La Tierra es un planeta de tamaño medio que gira alrededor de una estrella corriente en los suburbios exteriores de una galaxia espiral ordinaria". Con esa frase nos hacía ser conscientes de que nuestro planeta es uno más entre la inmensidad que puebla el universo. Si en ese planeta, que aparentemente no tiene nada de especial, ha podido surgir la vida, ¿por qué no podría surgir también en otros?

La variedad de características que presentan los planetas y satélites del sistema solar no es nada comparada con la que existe si ampliamos el catálogo a todo el universo. Lo poco que conocemos todavía sobre los planetas extrasolares nos muestra que estos pueden presentarse en una amplísima variedad de tamaños, desde gigantes gaseosos mayores que Júpiter hasta pequeños planetas rocosos del tamaño de la

Tierra o Marte. Pueden alcanzar temperaturas enormes o estar cubiertos por una capa de hielo de un espesor de decenas o cientos de kilómetros. Pueden estar tan cerca de sus estrellas que el tiempo para completar una vuelta a su alrededor dure solo unos días. Algunos tardan lo mismo en girar alrededor de sí mismos que alrededor de su estrella, lo que hace que siempre presenten la misma cara hacia ella. También pueden existir exoplanetas que orbitan más de una estrella, mientras que a otros no les llega la luz de ninguna. La gran pregunta ahora es si alguno de ellos podría albergar estructuras similares a las que hemos descrito en el capítulo 2 cuando hablamos de las propiedades de los seres vivos. Es decir, entidades capaces de transformar la energía del ambiente utilizando una base genética para ello que, además, dote al sistema de la capacidad de evolución.

Por el momento, la Tierra es el único planeta conocido que alberga vida, algo que, a pesar de lo que hemos dicho al inicio de este capítulo, sí la convierte en especial, al menos en la pequeña porción del cosmos que hemos explorado. ¿Significa eso que la búsqueda de vida fuera de la Tierra tiene que ser guiada por la búsqueda de un planeta similar al nuestro? Lo cierto es que, a poco que pensemos, nos damos cuenta de que la Tierra no siempre ha sido como es ahora. En sus inicios, estaba cubierta de lava y las elevadas temperaturas no permitían la existencia de agua líquida en su superficie. Pero, poco a poco, el planeta se fue enfriando y el vapor de agua pudo condensarse y comenzar a caer en forma de lluvia, formándose así los primeros océanos. La atmósfera, inicialmente, era mucho más reductora que en la actualidad, ya que el oxígeno no estuvo presente en cantidades apreciables hasta hace unos 2000 millones de años. Pero, mucho antes de esa fecha, la vida ya había sido capaz de abrirse camino y, aunque no había pasado del estado microscópico, ya poseía todas las propiedades que caracterizan la vida actual.

Se podría decir que la variedad de especies que han poblado la Tierra a lo largo de su historia refleja la diversidad de condiciones ambientales que han imperado en el planeta en ese tiempo, condiciones que muchas veces han sido modificadas por la propia vida, hasta el punto de que no se puede entender la evolución del medio físico sin tener en cuenta la evolución del medio biológico y a la inversa. Todo lo expuesto nos muestra que nuestra búsqueda de vida en el cosmos no debería limitarse a la búsqueda de un planeta tremendamente similar a la Tierra, sino que deberíamos plantearnos cuáles son las condiciones que necesita la vida para poder surgir y mantenerse y examinar qué escenarios planetarios las poseen. Haciendo un esfuerzo por entender la vida en términos de los procesos esenciales que lleva a cabo, se podría decir que para que un planeta sea habitable debe poseer al menos las siguientes características:

- Valores de las variables fisicoquímicas ambientales (temperatura, pH, niveles de radiación, salinidad, etc.) dentro de unos rangos que permitan la estabilidad y funcionamiento de las moléculas biológicas.
- Presencia de un solvente que facilite que las reacciones químicas propias de la vida puedan tener lugar.
- Existencia de una fuente de energía externa que pueda ser utilizada para la realización del metabolismo.
- Disponibilidad de elementos químicos que permitan la construcción de las moléculas biológicas.

Las condiciones fisicoquímicas compatibles con la vida terrestre

Las limitaciones técnicas que han impedido durante buena parte de nuestra historia la caracterización de la vida microscópica, unidas a nuestra visión antropocéntrica del mundo,

han sido la causa de que durante mucho tiempo se pensara que la vida era un fenómeno muy frágil, que solo podía desarrollarse en el rango de condiciones que nos resultan más favorables a los humanos y las especies más cercanas a nosotros. Es decir, temperaturas y presiones moderadas, agua en abundancia, protección frente a la radiación, etc. Todo esto cambió con el descubrimiento de los extremófilos, es decir, de los organismos (microorganismos en su mayor parte) que viven en condiciones fisicoquímicas próximas a los límites compatibles con los procesos biológicos. Desde entonces, el estudio de estos organismos es una pieza esencial de la astrobiología, ya que entender las soluciones que han adoptado para poder desarrollar sus funciones vitales en condiciones que, en principio, parecen tan inhóspitas, puede ser de gran ayuda a la hora de imaginar cómo podría ser la vida en otros lugares del cosmos.

Actualmente se ha encontrado vida casi en todos los lugares en los que se ha buscado. Algunos de los ejemplos más extremos son el subsuelo, las proximidades de las chimeneas volcánicas submarinas —donde se combinan temperaturas muy elevadas con presiones también muy altas—, el agua caliente (y en algunos casos, hiperácida) de las fuentes hidrotermales, lugares tan secos y áridos como el desierto de Atacama, el agua ácida y rica en metales pesados de algunos ríos —como el río Tinto, en la península ibérica, uno de los ejemplos más representativos—, las salinas o las aguas a temperaturas bajísimas que existen bajo el hielo de la Antártida. Como vemos, en muchos de esos ejemplos, la vida no solo ha sido capaz de ingeniárselas para soportar una condición extrema, sino varias.

Lo que resulta más fascinante de los extremófilos es que su capacidad para vivir en ambientes como los descritos ha sido conseguida sin alterar las propiedades básicas de la vida terrestre. Los extremófilos tienen una bioquímica similar a la de los organismos mesófilos, que habitan ambientes con condiciones más alejadas de los extremos. Sus proteínas están

formadas por los mismos 20 L aminoácidos, su código genético es el mismo, los mecanismos de copia de su ADN son similares, siguen teniendo estructura celular, y así un largo etcétera. Lo que han logrado los extremófilos es adaptar esa bioquímica universal y esa estructura celular básica que poseemos todos los seres vivos terrestres a las condiciones particulares de los ambientes que habitan. El hecho de que la mayoría sean microorganismos sugiere que, aunque la vida pueda desarrollarse en una amplísima variedad de condiciones, la evolución de la complejidad estructural y funcional requiere unos valores de las variables fisicoquímicas dentro de unos rangos más estrechos.

Cuando se habla de los límites de la vida es importante distinguir entre la vida activa, capaz de realizar un metabolismo y completar sus ciclos reproductivos, y la vida que simplemente sobrevive en un estado latente, esperando a que las condiciones sean más favorables. En este último caso, las condiciones del ambiente pueden ser mucho más extremas, pero el concepto es totalmente distinto. En un caso hablamos de actividad y en el otro de resistencia. Quizás el ejemplo más conocido de formas de resistencia sean las esporas —unas estructuras que forman muchos microorganismos y también algunas plantas—, pero también existen algunos pequeños animales, como los tardígrados, o ciertos vegetales que, cuando las condiciones ambientales se vuelven muy adversas, pueden detener su metabolismo casi totalmente, siendo capaces de volver a la vida activa cuando las circunstancias mejoran.

Los tardígrados son unos pequeños animales invertebrados que, por su forma, a menudo se conocen como *osos de agua*. Su hábitat normal son ambientes húmedos, en particular la superficie de los musgos y líquenes, pero, dada su enorme resistencia a condiciones extremas de todo tipo (elevadas dosis de radiación, temperaturas entre –250 °C y 151 °C, inmersión en alcohol puro o éter, altas presiones, etc.), pueden ser encontrados en casi cualquier ambiente terrestre. A pesar

de lo fascinante que pueda resultar su capacidad para soportar condiciones como las descritas, la realidad es que los tardígrados no están en un estado activo cuando las circunstancias son tan adversas, sino en uno durmiente, similar a las esporas que hemos mencionado. En ese estado, pasan de tener un 85% de agua corporal a solo un 3%, sus funciones metabólicas casi se paralizan y son incapaces de reproducirse.

Los tardígrados serían candidatos ideales para emprender “viajes interplanetarios”, dada su capacidad demostrada en varias misiones para resistir las condiciones del espacio exterior; sin embargo, eso no quiere decir que pudieran colonizar otro planeta. De hecho, en agosto de 2019, la sonda israelí Beresheet se estrelló contra la superficie de la Luna. Meses después se supo que esta sonda llevaba en su interior miles de tardígrados deshidratados que, aun en el caso de que no se hubieran destruido durante el impacto, es altamente improbable que pudieran llevar a cabo un metabolismo activo en el ambiente lunar. Como mucho, podrán estar allí hasta que otra misión los recoja y les proporcione mejores condiciones.

Temperatura

La temperatura es un parámetro que afecta a casi todos los procesos biológicos. En general, su aumento implica más movimientos moleculares y mayor flexibilidad de las biomoléculas. Como consecuencia, las reacciones químicas suelen ser más rápidas y se acelera la degradación de muchas moléculas cruciales. También, como resultado de las altas temperaturas, las proteínas y los ácidos nucleicos pierden estabilidad, pudiendo llegar a desorganizar su estructura, lo que los incapacitaría para desempeñar sus funciones. En el caso de las membranas plasmáticas, el efecto es un aumento de su fluidez y permeabilidad, de modo que la regulación de las condiciones internas celulares puede verse alterada.

Es fácil entender que la reducción de la temperatura tiene los efectos contrarios: descenso en los movimientos moleculares y mayor rigidez de las biomoléculas. Como consecuencia, procesos como la catálisis enzimática o la difusión de sustratos funcionan más lentamente. Existen muchos microorganismos capaces de funcionar de forma óptima a altas o bajas temperaturas; sin embargo, dado que las estrategias asociadas a la adaptación a una u otra condición normalmente son opuestas, los adaptados a altas temperaturas no suelen conseguir sobrevivir a temperaturas más bajas y a la inversa.

Los microorganismos termófilos son aquellos cuyas temperaturas óptimas están por encima de 60 °C, mientras que los hipertermófilos requieren temperaturas de más de 80 °C. El récord de crecimiento a temperaturas elevadas lo tiene *Methanopyrus kandleri*, que puede reproducirse a 122 °C, algo que puede resultar increíble cuando pensamos en los daños que sufriríamos si sumergiéramos nuestras manos en agua hirviendo durante unos minutos. Lógicamente, los microorganismos termófilos e hipertermófilos habitan los lugares más cálidos de la Tierra, como las fuentes hidrotermales o las proximidades de las chimeneas volcánicas submarinas.

Para contrarrestar la menor estabilidad de las proteínas a temperaturas elevadas, estas suelen presentar un patrón de aminoácidos que tiende a aumentar su grado de compactación, al mismo tiempo que la interacción con el solvente disminuye. En general, existe una tendencia a disminuir el número de glicinas (un aminoácido que aumenta la flexibilidad) y a aumentar el de prolinas (que aumentan la rigidez).

Una característica llamativa de los microorganismos termófilos e hipertermófilos es que todos ellos poseen una enzima, denominada *girasa inversa*, que superenrolla la molécula de ADN en sentido contrario al del resto de organismos, algo que parece aumentar su resistencia a la degradación por calor. Otra propiedad típica del ADN de los hipertermófilos es su mayor grado de compactación, favorecido por la alta

concentración intracelular de sales y la presencia de ciertas proteínas que se unen a la molécula.

Por último, los lípidos que forman las membranas plasmáticas de los microorganismos adaptados a altas temperaturas son más rígidos y estables que los de los que viven a temperaturas más moderadas. Para ello, los enlaces de tipo éster, típicos de los lípidos de las membranas de mesófilos, son sustituidos por enlaces de tipo éter.

En el extremo contrario a los hipertermófilos están los organismos psicrófilos, adaptados a vivir a bajas temperaturas. Dada la lentitud de las reacciones metabólicas en estas condiciones, el valor inferior de la temperatura que permite la vida activa podría ser difícilmente observable. Algunas estimaciones sitúan este valor en –26 °C para los microorganismos y en –40 °C para organismos multicelulares capaces de adaptaciones más avanzadas. Los hábitats ocupados por los psicrófilos son las zonas polares, las profundidades de los océanos y los lagos que existen bajo los hielos de la Antártida.

Para contrarrestar la mayor estabilidad y rigidez de las biomoléculas en ambientes fríos, en el caso de los psicrófilos estas se estabilizan por fuerzas débiles y suelen presentar menos interacciones intramoleculares. Es fácil entender que, contrariamente a las proteínas de los termófilos, las de los psicrófilos están enriquecidas en glicinas y contienen pocas prolinas. Estas adaptaciones incrementan la flexibilidad en los centros activos de las enzimas, favoreciendo así la catálisis, aunque a veces eso suceda a costa de disminuir la especificidad por el sustrato. La estructura secundaria del ADN también es más estable a baja temperatura, lo que supone que todos los procesos que implican la apertura de la doble hélice —en general, todos los relacionados con la copia y el procesamiento de la información— se vean dificultados. El problema se ve parcialmente resuelto por el aumento en la síntesis de un tipo de enzimas, las helicasas, que ayudan a abrir la doble hélice.

Algo importante es que las propiedades del agua cambian cuando la temperatura desciende. Su viscosidad aumenta, mientras que su disponibilidad para las actividades celulares (lo que se conoce como *la actividad del agua*) disminuye. Además, cuando llega a formarse hielo en el ambiente extracelular, las células pueden llegar a sufrir estrés osmótico, que conduce a la salida de agua de las células. Para contrarrestar estos efectos, los microorganismos psicrófilos enriquecen su citoplasma con varios tipos de solutos y moléculas crioprotectoras que unen moléculas de agua, limitando su salida al exterior. Para evitar la cristalización y congelamiento del citoplasma, los psicrófilos también producen unas proteínas anticongelantes, que son altamente solubles.

Por último, la disminución de la temperatura también incrementa la compactación de las membranas celulares, que se hacen más rígidas y pierden su permeabilidad. Para evitar estos efectos, los lípidos de los psicrófilos están menos densamente empaquetados y tienen mayor grado de insaturación (mayor número de dobles y triples enlaces).

Presión

Las presiones elevadas dominan la vida que tiene lugar en las profundidades, ya sea en el subsuelo o bajo los océanos. Entre los efectos de esta condición destacan la mayor inestabilidad de las estructuras que requieren la interacción entre diferentes macromoléculas (por ejemplo, los ribosomas), el aumento de la compactación de las proteínas y el ADN, y la mayor rigidez de las membranas, algo que lleva asociada la disminución de su permeabilidad. Como vemos, en muchos casos, el efecto de aumentar la presión se asemeja al de disminuir la temperatura, por lo que no es extraño que muchas de las adaptaciones a estas dos condiciones sean similares.

Los organismos que viven en lugares con presiones elevadas se denominan *piezófilos* o *barófilos*. Entre sus estrategias

adaptativas se incluyen poseer proteínas con mayor flexibilidad y menos cavidades internas, la organización de ensamblajes moleculares que cambian menos su volumen como consecuencia de las variaciones en presión y el incremento de la fluidez de sus membranas por mecanismos similares a los observados en los psicrófilos.

El caso opuesto, las presiones bajas, no parece representar un obstáculo para la vida, más que el que podría derivar de la mayor pérdida de agua debido al incremento en la evaporación.

Salinidad

El interior celular puede mantenerse en condiciones salinas (tanto en concentración como en composición) diferentes de las que existen en el ambiente extracelular. Para ello, las membranas celulares disponen de lo que se denominan *bombas de protones*, que mueven diferentes iones a su través con el objetivo de equilibrar su concentración a ambos lados. Sin embargo, cuando la concentración de iones en el exterior aumenta mucho, las células se ven sometidas a estrés osmótico, lo que podría ocasionar una salida del agua celular que, en último término, podría conducir a la desecación completa. Además del estrés osmótico, la toxicidad de algunos iones específicos también puede ser un factor limitante para la vida en algunos hábitats ricos en sales. Por último, los iones, a elevadas concentraciones, pueden tener un efecto caotrópico, consistente en la desorganización de la red tridimensional del agua, algo que influye en la interacción de sus moléculas con las proteínas o los ácidos nucleicos que se desnaturalizarían más fácilmente.

Comúnmente, a los microorganismos capaces de vivir en ambientes hipersalinos se los conoce como *halófilos*. Según la concentración de sal a la que su crecimiento es óptimo, los halófilos se clasifican en leves (que viven a una concentración

salina entre el 1 y el 3%), moderados (entre el 3 y el 15%) y extremos (por encima del 15%). En ambientes hipersalinos, como algunos tipos de rocas, los lagos salados o las salinas, la elevada concentración de sal exterior puede ser compensada por dos mecanismos diferentes. Uno de ellos consiste en la acumulación en el citoplasma de moléculas neutras como glicerol, ectoína o betaína, algo que permite cierta plasticidad en la cantidad de sal que se puede tolerar. La principal desventaja de esta estrategia es que es muy costosa energéticamente.

El otro mecanismo de adaptación implica el mantenimiento de una elevada concentración de potasio intracelular, lo que tiene como consecuencia que todos los procesos llevados a cabo por estos organismos deben estar adaptados a funcionar en esta condición, por lo que su plasticidad es menor. Las proteínas de los halófilos que emplean esta última estrategia suelen estar enriquecidas en aminoácidos ácidos que producen un incremento de cargas negativas que son neutralizadas por la alta concentración de iones positivos en el citoplasma.

Los ambientes hipersalinos suelen estar asociados a una alta intensidad de radiación, ya que en muchos casos el aumento en la concentración de la sal se debe a la evaporación del agua. La radiación será el último parámetro fisicoquímico cuya influencia analizaremos.

Radiación

La forma más común de radiación dañina que llega a la superficie terrestre es la ultravioleta. Esta, además de ser mutagénica y producir daños en el material genético, puede alterar otras biomoléculas y estructuras celulares debido a la generación de lo que se denominan *especies reactivas del oxígeno*, que provocan daño oxidativo. En nuestro planeta estamos parcialmente protegidos frente a la radiación ultravioleta gracias a la existencia de la capa de ozono. Sin embargo, no siempre ha

existido esa capa, ya que para su formación se requiere oxígeno y ese gas estuvo casi ausente de la atmósfera de la Tierra durante aproximadamente los 2000 primeros millones de años de su historia. En esa época, además, el Sol emitía mucha más proporción de radiación ultravioleta que la que emite ahora, algo que aumentaba la necesidad de protección.

Dentro de las estrategias de protección frente a la radiación ultravioleta, la producción de pigmentos, capaces de absorber la luz y reflejarla, ocupa un lugar destacado. Algunos pigmentos, además, pueden excitarse electrónicamente, lo que hace que reaccionen rápidamente con algunas biomoléculas, protegiéndolas así de las reacciones de oxidación. También es frecuente el aumento en la síntesis de moléculas específicas encargadas de la reparación del ADN dañado. Por último, existen otro tipo de estrategias, de tipo más defensivo, que consisten en la elección de hábitats en los que la radiación tiene dificultades para penetrar, como, por ejemplo, el subsuelo o cierta profundidad bajo el agua.

Otro tipo de radiación muy perjudicial para la vida es la ionizante. Los daños de la radiación ionizante afectan sobre todo al ADN, en cuya molécula pueden introducir múltiples tipos de roturas. En general, los mecanismos de defensa son del mismo tipo que los utilizados en el caso de la radiación ultravioleta.

Los rayos cósmicos son un tipo particular de radiación ionizante. Se trata de partículas subatómicas con una energía extremadamente elevada que se desplazan por el espacio casi a la velocidad de la luz y que acaban impactando sobre la superficie de los cuerpos planetarios. Pueden ser de dos tipos: galácticos y solares. La radiación cósmica galáctica se origina en las explosiones de supernovas, estrellas gigantes que colapsan y se transforman en estrellas de neutrones, agujeros negros o se destruyen por completo. La energía emitida en estas explosiones acelera las partículas cargadas, por lo que estas se vuelven altamente penetrantes y muy difíciles de

bloquear. La radiación cósmica solar está constituida por partículas cargadas emitidas por el Sol, principalmente electrones, protones y núcleos de helio. Parte de esta radiación es emitida constantemente por la corona solar, por lo que los científicos le han dado el nombre de *viento solar*. Afortunadamente, en la Tierra estamos protegidos de la mayor parte de la radiación cósmica, gracias a la existencia de un poderoso campo magnético que es capaz de desviarla. Pero no ocurre así en todos los planetas, algo de lo que hablaremos más adelante.

La necesidad de un solvente

La disponibilidad de un solvente líquido es considerada una condición esencial para la vida. Las razones son variadas, pero básicamente podemos señalar dos fundamentales. La primera es que las reacciones químicas del metabolismo deben ocurrir en un líquido que permita que los reactivos se encuentren y puedan interaccionar entre ellos. La segunda es la capacidad de los líquidos para ayudar a que la temperatura no experimente variaciones bruscas. Por eso, no es extraño que el agua represente una fracción considerable del peso corporal de la mayoría de los organismos.

Todos los seres vivos de nuestro planeta utilizan agua líquida como solvente, algo que nos puede hacer pensar que la presencia de esta molécula es esencial para la vida. De hecho, la capacidad de un planeta para mantener agua en estado líquido de forma sostenida es uno de los criterios más importantes para determinar si ese planeta es habitable o no. Sin embargo, la presencia de agua no siempre implica la existencia de vida y quizás pueda haber vida que utilice un solvente diferente.

Hay muchas razones por las que la vida terrestre utiliza agua como solvente: la primera es su abundancia en nuestro planeta y, la segunda, está relacionada con la naturaleza polar

de sus moléculas. Como sabemos, una molécula de agua está formada por un átomo de oxígeno unido, a través de enlaces covalentes, a dos átomos de hidrógeno. Aunque la carga neta de la molécula es nula, esta no se distribuye de forma uniforme. El oxígeno atrae los electrones de los enlaces covalentes con más fuerza que el hidrógeno, por lo que el oxígeno queda cargado negativamente y el hidrógeno positivamente, resultando una molécula que puede interaccionar con otras a través de interacciones electrostáticas que se denominan *puentes de hidrógeno*. De este modo se genera una gigantesca red que posee propiedades diferentes de las que tendría el conjunto de moléculas de agua aisladas. La red es algo dinámico, ya que los enlaces por puentes de hidrógeno se están formando y destruyendo de forma continua. De hecho, siempre hay una fracción de moléculas de agua libres, algunas de las cuales se disocian en protones e iones hidroxilo que pueden intervenir en diversas reacciones químicas. Por lo tanto, el agua no solo favorece el metabolismo, sino que puede tomar parte activa en él.

Los puentes de hidrógeno son los responsables de la capacidad del agua para disolver sustancias polares o favorecer interacciones con las partes de algunas moléculas por las que tiene mayor afinidad. Esto último contribuye a la formación de estructuras como las membranas plasmáticas o el plegamiento de las proteínas.

La red formada por las moléculas de agua también es la causa de que el hielo sea menos denso que el agua líquida, permitiendo así que este no se acumule en el fondo de los océanos. Como veremos, esta última propiedad hace posible que algunos planetas o satélites helados puedan contener gigantescos océanos de agua líquida bajo su corteza.

Otro aspecto relevante de cara a la búsqueda de vida en otros mundos es que el rango de temperaturas en que el agua puede estar en forma líquida varía enormemente en función de la presión o la presencia de ciertas sales. En algunos casos,

estas condiciones son incompatibles con la vida terrestre, pero podrían ser adecuadas para otras formas de vida desconocidas. Por ejemplo, las sales del tipo de los percloratos —muy abundantes en Marte— pueden descender el punto de congelación del agua hasta unos –65 °C. Dada la gran cantidad de escenarios planetarios en los que la temperatura puede estar cercana a ese valor, el estudio de las condiciones que facilitan el mantenimiento del agua en estado líquido a bajas temperaturas, así como las posibles adaptaciones de la vida a esas condiciones, adquieren una gran relevancia. Las altas presiones también favorecen que el agua permanezca en estado líquido tanto a valores bajos de temperatura como a otros muy por encima de la temperatura máxima compatible con la vida terrestre. Sin embargo, ya hemos visto que a altas temperaturas las moléculas biológicas aceleran su degradación, lo que hace que, aun habiendo agua líquida, podría no existir vida, al menos si esta es similar a la que conocemos.

Algo importante que deberíamos tener en mente es que la vida terrestre es capaz de adaptarse a condiciones en que la disponibilidad de agua es muy limitada. Este hecho nos lleva a pensar que no es necesario soñar con planetas que contengan grandes océanos para que la posibilidad de la existencia de vida pueda ser una realidad. Dentro de este contexto, el parámetro a considerar es la actividad del agua o, lo que es lo mismo, el agua que en un determinado ambiente está accesible para la vida. Sus valores varían entre 0, cuando no hay nada de agua accesible, y 1, cuando toda ella puede ser utilizada en los procesos biológicos. El límite inferior compatible con la vida terrestre se ha establecido en 0,605, un valor muy cercano al que existe en lugares con elevada insolación y alta concentración de sales, que al hidratarse pueden "secuestrar" una buena parte del agua disponible. Entre las adaptaciones a las condiciones de sequedad extrema está la formación de matrices extracelulares que restringen la evaporación de agua. En otros casos, como el de algunos microorganismos que

viven en el desierto de Atacama, la adaptación consiste en utilizar como hábitat los pequeños nódulos existentes en las rocas de halita, un mineral capaz de atraer el agua de la atmósfera.

Todo lo expuesto hasta ahora nos muestra que el agua es condición imprescindible, pero no suficiente, para la vida terrestre. Puede haber condiciones que permitan la existencia de agua líquida, pero que sean incompatibles con la estabilidad de las biomoléculas que conocemos. Esas condiciones, y otras aún más extremas, pueden ser comunes en otros planetas, lo que nos lleva a plantearnos si podría haber surgido algún tipo de vida diferente capaz de desarrollarse en esas circunstancias. Si, a partir del mismo origen, la vida terrestre ha podido diversificarse de tal forma que es capaz de prosperar en el amplio rango de valores de las variables ambientales que hemos detallado, no es impensable que una vida con otro origen y/o basada en biomoléculas y estructuras diferentes pudiera hacerlo en un rango aún mayor.

Una cuestión que se plantea recurrentemente es si el agua es imprescindible para cualquier tipo de vida; en otras palabras, si no podrían existir solventes alternativos. Es difícil pensar en un líquido que ofrezca tantas ventajas para la vida como el agua. Además, el agua, en forma de vapor, forma parte de la atmósfera de muchos planetas, por lo que es fácil que pueda condensarse y permanecer sobre su superficie en estado líquido. Pero quizás haya lugares en los que otros solventes podrían ser más accesibles. Entre los propuestos están el amoniaco, el nitrógeno líquido o el metano. Todos ellos comparten la propiedad de mantenerse en estado líquido a temperaturas mucho más bajas que el agua, lo que podría ser de interés en planetas muy alejados de sus estrellas y que no tienen acceso a otra fuente de calor. Sin embargo, ya hemos visto los problemas para que el metabolismo y, en general, cualquier reacción química, pueda tener lugar a temperaturas bajas. Eso nos hace pensar que cualquier tipo de vida basada

en estos solventes probablemente sería mucho más simple que la terrestre.

Las fuentes de energía y material para construir las moléculas biológicas

La disponibilidad de una fuente de energía es un requisito necesario para el funcionamiento del metabolismo y para que la vida pueda mantenerse como un sistema altamente organizado situado fuera del equilibrio termodinámico. Como ya se ha indicado, toda la vida terrestre utiliza tres fuentes de energía: la solar, la desprendida en reacciones químicas inorgánicas que ocurren en el ambiente y la almacenada en los compuestos de carbono sintetizados por otros seres vivos. Sin embargo, existen otras muchas fuentes de energía en el universo que podrían estar accesibles para otros tipos de vida. En particular, la energía térmica es tremendamente ubicua y, dada la facilidad con la que se pueden establecer gradientes, podría ser utilizada como fuente básica del metabolismo.

La energía eólica ya fue propuesta por Carl Sagan para su uso por potenciales formas de vida en los planetas gaseosos. Otras alternativas son la energía de la gravedad o, incluso, la energía nuclear. El hecho de que ninguna de estas energías sea utilizada por la vida terrestre, a pesar de estar disponibles en nuestro planeta, sugiere que son menos eficientes. Sin embargo, no debemos olvidar que lo que es válido para un tipo de bioquímica puede no serlo para otra diferente. Cuando se estudia la fotosíntesis, uno no puede sino maravillarse de cómo la evolución ha podido hacer que surja un proceso tan complejo que consigue transformar la energía luminosa del sol en energía química que sustenta la mayor parte de la masa de la biosfera. Así que, en circunstancias ambientales distintas o con moléculas y estructuras diferentes de las que utiliza la vida terrestre, ¿qué sorpresas podríamos no llevarnos?

Respecto a la disponibilidad de elementos químicos para construir las moléculas y estructuras de la vida, ya sabemos que, de todos los elementos que existen en el universo, la vida ha escogido seis fundamentales: carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre (CHONPS). El hecho de que todos ellos sean accesibles en muchos lugares del universo hace pensar que cualquier otra vida que encontremos muy posiblemente también estará basada en su combinación. Sin embargo, el hallazgo de que la vida terrestre es capaz de, entre ciertos rangos, adaptar su composición a las peculiaridades del ambiente sugiere que, en las posibles vidas extraterrestres, esos elementos fundamentales podrían estar en proporciones distintas a las que estamos acostumbrados.

Habitabilidad planetaria

Los hallazgos obtenidos en las investigaciones llevadas a cabo sobre los microorganismos extremófilos han aumentado considerablemente nuestras expectativas sobre los valores de las variables fisicoquímicas existentes en los posibles mundos que podrían albergar vida. La disponibilidad de fuentes de energía y elementos químicos para construir las moléculas biológicas tampoco parece ser un factor limitante. Lo que nos queda, por tanto, para definir la habitabilidad de otro lugar del cosmos es la presencia de un solvente que permita que las reacciones químicas del metabolismo puedan tener lugar. Dado que, para un amplio rango de valores de presión y temperatura, el agua parece ser el mejor solvente compatible con la vida, se ha definido la zona de habitabilidad de una estrella como la región alrededor de la misma en la cual los planetas asociados pueden mantener agua líquida de forma estable sobre su superficie.

En la definición que hemos dado de zona de habitabilidad es muy importante el término *estable*, ya que la aparición

de la vida en un planeta puede requerir periodos de tiempo de cientos de millones de años, lo que significa que no basta con que exista agua líquida durante periodos ocasionales. Es fácil entender que los planetas demasiados cercanos a su estrella reciben demasiado calor, lo que provocaría que el agua se evaporara rápidamente. Por el contrario, en los planetas situados demasiado lejos de su estrella, la temperatura sería tan baja que toda el agua permanecería en forma de hielo.

La zona de habitabilidad depende del tipo de estrella, de su edad y de diversas características del planeta que estemos considerando, entre las que se encuentran algunas tan importantes como su masa, si es rocoso o gaseoso, la presencia de atmósfera o la existencia de un campo magnético. En el sistema solar, ahora mismo solo hay un planeta que está en la zona de habitabilidad del Sol, tal y como la hemos definido. Ese planeta es la Tierra. Los otros dos planetas rocosos que, por su distancia al Sol, también podrían haber estado en su zona de habitabilidad son Venus y Marte. Sin embargo, Venus tiene una atmósfera muy densa que ejerce una presión unas noventa veces superior a la terrestre. Está compuesta principalmente por dióxido de carbono y causa un efecto invernadero de tal magnitud que no permite que la superficie del planeta deje escapar el calor recibido del Sol. Como consecuencia, su temperatura en superficie es de unos 460 °C, mayor que la de Mercurio, a pesar de que este último está más cercano al Sol.

En esas condiciones es difícil pensar en la permanencia de agua líquida sobre la superficie de Venus. A Marte, sin embargo, le sucede lo contrario. Tiene una atmósfera muy tenue, aproximadamente unas cien veces menos densa que la terrestre. Aunque está compuesta mayoritariamente por dióxido de carbono, su baja densidad hace que el planeta apenas pueda retener el calor recibido del Sol, lo que hace que su temperatura media superficial sea de –55 °C. Estas condiciones de presión y temperatura son incompatibles con la presencia

de agua líquida en su superficie, por lo que toda el agua que hay sobre Marte está en forma de hielo.

Actualmente sabemos que gran parte de la vida que existe en la Tierra está en las profundidades, bien en el subsuelo o bajo los océanos. Por tanto, no solo el agua superficial cuenta para que pueda surgir y mantenerse la vida. De hecho, la mayor presión que existe en el subsuelo puede favorecer la presencia de agua líquida en lugares como Marte, donde las temperaturas en superficie son muy bajas. Por otro lado, un planeta puede tener acceso a otras fuentes de calor, además del recibido de su estrella. Pueden existir fuentes de calor residual que se mantengan desde el periodo de formación del planeta y que, lógicamente, se encontrarán bajo la superficie. Otra importante fuente de energía es la producida por la atracción gravitatoria que los planetas muy grandes ejercen sobre sus satélites. Esta energía es capaz de deformar la superficie del satélite de forma periódica, haciendo que esta se eleve y descienda, igual que lo hacen los océanos de la Tierra por la atracción de nuestra luna. Esa deformación es capaz de originar el calor necesario para que bajo la superficie helada de lugares como Europa, Encélado o Titán puedan mantenerse gigantescos océanos de agua líquida. Para la existencia de vida en esos lugares sería crucial que el agua estuviera en contacto con el núcleo rocoso del planeta. De ese modo podría tener acceso a los elementos necesarios para que se generen las moléculas de la vida y, también, para que puedan tener lugar las reacciones químicas de algún tipo de metabolismo.

Respecto a la radiación emitida por las estrellas, hay que señalar que no todas ellas se comportan igual. Según el orden decreciente de su temperatura superficial, las estrellas se pueden clasificar en siete tipos: O, B, A, F, G, K y M. En general, las zonas de habitabilidad son más amplias y están más alejadas de su estrella cuanto mayor sea su temperatura superficial. Sin embargo, estas estrellas queman su hidrógeno rápidamente y suelen tener una vida muy corta que dificulta que

puedan tener planetas asociados y, en caso de tenerlos, que permanezcan en la zona de habitabilidad el tiempo necesario para que pueda surgir la vida en ellos.

Las enanas rojas (pertenecientes al tipo M) son las estrellas más pequeñas y menos luminosas. También son las más numerosas y las de vida más larga. Estas estrellas tienen zonas de habitabilidad muy estrechas y próximas, lo que hace que los planetas situados en ellas estén expuestos a niveles de rayos X y radiación ultravioleta cientos de miles de veces más intensos que los que recibe la Tierra del Sol. Como consecuencia, sus atmósferas pueden desaparecer muy pronto, "barridas" por la potente radiación que reciben. Además, en sus primeras etapas, estas estrellas suelen emitir potentes fulguraciones que podrían esterilizar cualquier planeta en el que la vida estuviera comenzando a avanzar. Puesto que esas emisiones suelen ir desapareciendo con el tiempo, se piensa que las enanas rojas generan mejores condiciones de habitabilidad cuando ya tienen cierta edad. Las estrellas amarillas de tipo G, como nuestro sol, sabemos que pueden sostener planetas habitables en los que la vida ha florecido. Sin embargo, estas estrellas no son muy comunes en nuestra galaxia. Algunos científicos consideran que las estrellas ligeramente más frías y menos luminosas que el Sol —las enanas naranjas de tipo K— son potencialmente mejores para la vida debido a que tienen un tiempo de vida muy largo que abre un amplio espacio para la evolución de la complejidad biológica. Pero las estrellas tampoco emiten el mismo tipo de radiación a lo largo de toda su vida. Inicialmente emiten más radiación ultravioleta y menos infrarroja, una situación que se va invirtiendo a lo largo del tiempo. Como consecuencia, cuanto mayor es la edad de una estrella, la zona de habitabilidad se va desplazando más hacia el exterior.

Respecto a las condiciones planetarias, existe un amplio consenso en que para que un planeta (o satélite) pueda albergar vida, este debe ser rocoso y contener una atmósfera con la

composición y densidad adecuadas para mantener la temperatura superficial en un rango de valores compatibles con la existencia de agua líquida y la actividad biológica. Otro factor importante es la existencia de una tectónica de placas similar a la terrestre, que permita el reciclaje de los materiales utilizados por la vida. La litosfera terrestre está formada por gigantescas placas que se desplazan sobre el manto fluido subyacente. Cuando una placa oceánica choca con una placa continental, se generan las zonas de subducción, lugares donde el material de la corteza se introduce en el manto donde se funde, pudiendo volver a aflorar después a través de volcanes y grietas en la superficie. De este modo, el dióxido de carbono atmosférico, que poco a poco ha sido secuestrado por la actividad biológica y por algunas reacciones abióticas, puede completar su ciclo volviendo de nuevo a la atmósfera.

Por último, mencionaremos la importancia de la existencia de un campo magnético a nivel planetario. En la Tierra, la existencia de un núcleo metálico fluido permite que, gracias al movimiento de rotación terrestre, se forme una gigantesca dinamo capaz de generar un campo magnético, la magnetosfera, alrededor de nuestro planeta. Su importancia es crucial para la vida, ya que nos protege del viento solar que, de otro modo, interaccionaría con la atmósfera provocando su liberación al espacio y causando un enfriamiento del planeta. El campo magnético también nos protege frente a los rayos cósmicos, cuya elevada energía es capaz de destruir las moléculas biológicas.

CAPÍTULO 4
La búsqueda

El universo es un sitio bastante amplio. Si solo estamos nosotros, me parecería un auténtico desperdicio de espacio.

CARL SAGAN

Cualquier intento de búsqueda de vida fuera de la Tierra pasa inevitablemente por definir unos criterios que contribuyan a focalizar nuestro objetivo. Lo deseable es que esos criterios nos ayuden a decidir qué lugares son más favorables (o lo fueron en el pasado) para la aparición y sostenimiento de la vida, qué es lo más esperable que encontremos y, por último, qué estrategias de exploración emplearemos.

Respecto a la primera cuestión, dónde buscar, un conocimiento lo más detallado posible del planeta o satélite que queramos examinar será muy útil para determinar sus probabilidades de habitabilidad. En ese sentido, todos los parámetros y condiciones descritos en el capítulo anterior pueden ser una guía válida, aunque hay que tener en cuenta que normalmente solo podremos recabar información sobre algunos de ellos y que, en algunos casos, esa información será indirecta.

Respecto a qué es lo que esperamos encontrar, inevitablemente, la búsqueda de vida extraterrestre va a estar sesgada por las propiedades de la vida que conocemos, algo que nos limita, pero que al menos nos proporciona un punto de partida para comenzar esta aventura de conocimiento. En este sentido, es muy importante tener en mente el concepto de *biomarcador* o

biofirma, que podría definirse como cualquier elemento, molécula, sustancia, estructura o proceso que pueda ser usado como evidencia de vida presente o pasada y que no tenga su origen en procesos abióticos. La última parte de la definición es la que más problemas plantea, ya que distinguir si el origen de un potencial biomarcador es biótico o abiótico puede no ser tarea fácil, como veremos más adelante. Hay muchos posibles biomarcadores que pueden tener un origen puramente químico o geológico, por eso hay que ser muy cautos a la hora de presentarlos como evidencia de vida, sobre todo cuando no se conocen bien los procesos que ocurren en el lugar donde han sido detectados.

Por último, las estrategias de búsqueda que empleemos van a estar directamente relacionadas con lo que esperemos encontrar y el acceso que tengamos al lugar a explorar. Dentro del sistema solar podemos realizar una inspección más directa, a través de misiones que orbitan alrededor del cuerpo planetario deseado, tomando datos de su atmósfera o realizando fotografías aéreas de su superficie. En algunos casos será posible diseñar vehículos que aterricen en el lugar propuesto, pudiendo incluso desplazarse por su superficie. Sin embargo, en el caso de los exoplanetas, esas estrategias están fuera de nuestro alcance y habrá que recurrir al uso de telescopios que, de forma indirecta la mayor parte de las veces, nos permitan inferir algunas de sus características.

En estrecha relación con todo lo mencionado está el estudio de la vida en lugares de nuestro planeta que, por sus valores de las variables fisicoquímicas, pueden ser considerados análogos terrestres de ambientes extraterrestres. Por ejemplo, el río Tinto, en Huelva, por su abundancia en hierro y su acidez, puede ser considerado un análogo del Marte de épocas antiguas, en las que el agua podría haber sido abundante. El desierto de Atacama, sin embargo, por su riqueza en percloratos, su escasa humedad y sus elevados niveles de radiación, sería un análogo del Marte actual, lo mismo que sucede con la Antártida por sus bajas temperaturas, su sequedad y las también elevadas dosis de radiación

que recibe. Los lagos subglaciales antárticos, como Vostok o Ellsworth, situados bajo capas de hielo de varios kilómetros de espesor, son lugares muy interesantes para evaluar las posibilidades de vida en los océanos que existen bajo la corteza helada de algunas lunas del sistema solar. La laguna de Tirez, en la provincia de Toledo, a pesar de ser un ambiente superficial, debido a sus aguas ricas en sulfatos magnésicos y sódicos también se asemeja a algunos de estos océanos subterráneos. Como vemos, no es necesario que un ambiente terrestre recree todas las características de un ambiente extraterrestre para que sea considerado un análogo del mismo. Hemos mencionado varios análogos de Marte; aunque ninguno de ellos posee todas las características ambientales de este planeta, sí que se asemejan en algunos aspectos. Entender cómo la vida terrestre se las ha ingeniado para poder desarrollarse en esas condiciones es un instrumento muy útil para aventurar cómo podría ser (o haber sido) la posible vida marciana.

A veces, ciertas características propias de ambientes extraterrestres pueden ser generadas en el laboratorio, por ejemplo, en cámaras de simulación en las que se recrea la composición de gases y las condiciones de radiación de otras atmósferas planetarias. De este modo, es posible estudiar cómo se comportarían las moléculas o los microorganismos terrestres en condiciones que no existen en la Tierra. Incluso es posible exponer materiales o instrumentos para determinar su resistencia y poder así evaluar si son o no óptimos para formar parte de misiones espaciales.

Búsqueda de biomarcadores en el sistema solar

Microfósiles y huellas en las rocas

En la Tierra, los signos de vida pasada más fáciles de identificar son estructuras fosilizadas correspondientes a restos de

animales y plantas. Las partes duras de los organismos, como los esqueletos o las conchas de los moluscos, también pueden persistir durante mucho tiempo, incluso sin llegar a fosilizarse. No cabe duda de que encontrar algo así en otro planeta sería interpretado como un signo inequívoco de vida, ya que es difícil que estructuras tan complejas y organizadas, a las que además se puede asignar una funcionalidad, sean producidas por procesos no relacionados con la vida.

Sin embargo, como ya se ha indicado, las evidencias que tenemos hasta ahora indican que en el sistema solar no existe vida multicelular y, por tanto, no es esperable encontrar estructuras como las descritas. Como mucho, podrían encontrarse fósiles de organismos microscópicos, los microfósiles, cuya identificación, incluso en la Tierra, no suele estar exenta de controversia. Cuando se rastrea el registro geológico en busca de los restos de los organismos más antiguos, lo que se va buscando son microfósiles. Y a veces no es fácil que haya un consenso sobre si lo encontrado tiene un origen biótico o abiótico. Las dificultades son aún mayores si lo que se trata de identificar son signos de vida en rocas extraterrestres, como sucedió en el caso del meteorito ALH84001, de origen marciano. A continuación, haremos un inciso para relatar esta historia.

En 1984, un equipo de científicos americanos encontró una roca de 1,9 kilogramos en la región de Allan Hills, en la Antártida. Los análisis iniciales ya mostraron que la abundancia relativa de los isótopos oxígeno-16, oxígeno-17 y oxígeno-18 era claramente diferente a la que existe en las rocas terrestres, las procedentes de asteroides o los meteoritos lunares. Además, la composición del gas atrapado dentro de la roca era muy similar al de la atmósfera marciana, lo que hizo que esta se identificara como un meteorito de origen marciano que se catalogó como ALH84001. El término indica el lugar donde fue encontrado (ALH, de Alan Hills), el año (1984) y que era el primer meteorito encontrado por la

expedición (001). Los estudios radiométricos pronto mostraron que el meteorito era muy antiguo, con una edad de unos 4100 millones de años, lo que indicaba que su origen había tenido lugar al poco tiempo de formarse el planeta, en una época en la que las condiciones podían haber sido favorables para la vida. La roca probablemente permaneció en Marte durante un largo periodo de tiempo, hasta que, hace 16 millones de años, el impacto de otro cuerpo la arrancó de la superficie. Las huellas dejadas por los rayos cósmicos muestran que el meteorito estuvo viajando por el espacio durante casi todo este tiempo, hasta que hace unos 13 000 años cayó en la Antártida, donde permaneció enterrado hasta que la misión de Alan Hills lo encontró.

Pronto se vio que el meteorito ALH84001 contenía minúsculos gránulos de carbonato que tenían una edad de unos 3800 millones de años. Este hallazgo sugería que la roca había sido infiltrada por agua líquida que provocó la precipitación de los carbonatos, lo que indicaba que en Marte el agua debía de haber fluido por la superficie en tiempos remotos. Pero aún hay más… Los gránulos de carbonato poseían una estructura en capas que, al menos en la Tierra, es típica de la actividad biológica. Además, en su interior se encontraron diversos hidrocarburos policíclicos aromáticos —un tipo de moléculas orgánicas que pueden ser producidas a partir de restos de organismos—, y también cristales de magnetita, similares a los que se forman en el interior de algunas bacterias magnetotácticas terrestres. Pero lo más importante y sorprendente fue el examen al microscopio de los gránulos, que mostró estructuras que se asemejaban a bacterias fosilizadas terrestres, aunque de mucho menor tamaño. Aunque cada uno de estos hallazgos por separado probablemente no habría sido interpretado como un signo de vida, su encuentro simultáneo pronto hizo pensar en un origen biológico, algo que fue anunciado públicamente el 7 de agosto de 1996 por la NASA, junto con el líder del equipo que había llevado a cabo las

investigaciones, David McKay. Esa misma tarde, el entonces presidente americano Bill Clinton hizo unas declaraciones en la prensa en las que resaltaba la trascendencia para la humanidad del descubrimiento de que, en algún momento del pasado, la vida también se hubiera abierto camino en Marte.

Muy pronto, otros investigadores comenzaron a hacer análisis para comprobar si lo encontrado en el meteorito ALH84001 pudiera tener su origen en procesos abióticos. Y la respuesta fue que sí. Por ejemplo, las propias filtraciones de agua: si esta estaba enriquecida en ciertos elementos, podrían haber dado lugar a la estructura en capas encontrada en los gránulos de carbonato. Los hidrocarburos policíclicos aromáticos también podrían haber sido formados por procesos químicos que no tienen nada que ver con la vida, al igual que los cristales de magnetita. Y, por último, lo más importante, las estructuras que se asemejaban a bacterias parecían ser demasiado pequeñas para incluir todos los componentes que contenían las bacterias terrestres más pequeñas que se conocían hasta ese momento.

El último argumento puede ser discutible, ya que no parece muy lógico que se asuma que la vida en Marte debiera tener las mismas propiedades y requerimientos que la vida terrestre. De hecho, años más tarde, en nuestro propio planeta se han encontrado bacterias de un tamaño similar a las estructuras encontradas en el meteorito ALH84001. Estas bacterias pueden realizar sus procesos vitales a pesar de su pequeño tamaño gracias a su capacidad para establecer interacciones con otros microorganismos. Por tanto, el tamaño no parece una razón válida para descartar la posibilidad de que las estructuras encontradas en el ALH84001 correspondieran a microfósiles bacterianos. Sin embargo, el hecho de que en meteoritos no procedentes de Marte se hayan encontrado organizaciones similares, cuyo origen es claramente no biológico, es una prueba importante en contra de que lo encontrado en el ALH84001 sean restos de bacterias que vivieron en

el planeta rojo hace miles de millones de años. El debate continúa, aunque la mayoría de los científicos defienden que lo encontrado no aporta evidencias claras de vida pasada en Marte. Pero eso no significa que los hallazgos no tengan valor, ya que nos han mostrado que Marte en el pasado fue húmedo, tuvo fuentes de calor y condiciones que facilitaron la síntesis de moléculas orgánicas, todo lo cual ha sido demostrado posteriormente en diversas misiones.

Aun no encontrando microfósiles, es posible encontrar estructuras y marcas dejadas por la vida que también podrían ser interpretadas como biomarcadores. Un ejemplo de estas estructuras son los estromatolitos terrestres, mencionados al hablar de las evidencias de vida más antiguas encontradas en nuestro planeta. Los microorganismos también pueden dejar sus huellas en las rocas en forma de agujeros, túbulos o cavidades que les podrían haber servido de refugio. Sin embargo, al igual que en el caso de los microfósiles, es posible que estas estructuras puedan tener su origen en procesos abióticos, lo que hace necesario recurrir a otros análisis que permitan determinar con mayor precisión cuál es el proceso que ha conducido a su formación.

Fósiles moleculares

Otro grupo muy importante de biomarcadores son las macromoléculas que forman parte de la vida terrestre o los productos de su degradación, los denominados *fósiles moleculares*. Desafortunadamente, las macromoléculas biológicas son muy lábiles y se degradan fácilmente, por lo que su detección no es fácil. Sin embargo, en algunos casos, por ejemplo, en el de los lípidos que forman las membranas celulares, los productos que se obtienen tras su degradación son más estables y, por tanto, su asignación como biomarcadores puede ser más fiable. Dentro de esta línea de investigación, sería muy importante analizar experimentalmente cuáles son los productos que

resultan tras exponer diferentes moléculas biológicas a condiciones ambientales típicas de ambientes extraterrestres recreados en el laboratorio. Esos experimentos también podrían ser realizados con otras moléculas que, aunque no estén presentes en la vida terrestre, podrían realizar funciones similares en otros tipos de vida.

Evidencias moleculares de metabolismo

Otra estrategia de búsqueda muy útil consiste en la detección de evidencias moleculares de metabolismo, basándose en el uso preferencial que hace la vida de unos elementos o moléculas sobre otros. Ya hemos visto que cuando una molécula puede existir en dos estados quirales, la vida suele tener preferencia por uno de ellos. Las proteínas siempre están formadas por L aminoácidos y los ácidos nucleicos por D azúcares, lo que sugiere que si en una muestra extraterrestre encontramos un exceso quiral de una molécula, este podría ser producto de la vida. El problema es que, tras la muerte, el orden típico de los sistemas vivos tiende a desaparecer y la homoquiralidad no es una excepción. Con el tiempo los aminoácidos y los azúcares que formaban los seres vivos tienden a crear mezclas racémicas, lo que limitaría el uso de esta estrategia.

Otra propiedad que manifiesta la vida terrestre es su preferencia por algunos de los isótopos estables de ciertos elementos químicos. Por ejemplo, de los dos isótopos estables del carbono (el carbono-13 y el carbono-12), la vida suele tener preferencia por el más ligero (el carbono-12). Lo mismo sucede en el caso del oxígeno, el nitrógeno, el azufre o el hierro. Esto conduce a que los isótopos más pesados se acumulen en el ambiente circundante a las estructuras vivas, de modo que se produce lo que se conoce como *fraccionamiento isotópico* o distribución diferencial de las formas isotópicas en que un elemento químico puede presentarse. Su detección

requiere la medida de ambos isótopos (el ligero y el pesado) en más de un ambiente, lo que puede complicar la interpretación. Además, existen algunos procesos geológicos que también pueden alterar las relaciones entre isótopos. Un ejemplo de la controversia que puede plantear este tipo de análisis es la interpretación como posible signo de vida de las relaciones isotópicas, fuertemente sesgadas hacia el isótopo más ligero del carbono, existentes en algunas rocas muy antiguas. ¿Puede esto ser considerado una evidencia de vida? Mientras que algunos investigadores afirman que sí, otros dicen lo contrario, basándose en que la circulación de fluidos hidrotermales podría haber producido relaciones isotópicas similares.

Otra evidencia molecular de metabolismo la constituyen los desequilibrios químicos que la vida puede generar como consecuencia de su necesidad de obtener energía del ambiente. Un ejemplo sería la liberación de oxígeno en grandes cantidades a la atmósfera debida a la fotosíntesis. Sin embargo, hay que ser cauto con la interpretación de estos datos, ya que la composición de la atmósfera de un planeta es el resultado de los procesos químicos y geológicos que tienen lugar en él y que pueden estar condicionados por múltiples factores, como la masa del planeta o la proximidad a su estrella, entre otros.

Antes de continuar, merece la pena que tratemos en detalle los únicos experimentos que, por el momento, se han realizado sobre la superficie de otro cuerpo planetario, en este caso el planeta Marte, con objeto de comprobar si en él existía alguna forma de vida capaz de llevar a cabo transformaciones metabólicas. Nos estamos refiriendo a los experimentos realizados por el programa Viking de la NASA, compuesto por dos orbitadores y dos dispositivos de aterrizaje (*landers*), que en 1976 se posaron en dos lugares distantes de la superficie marciana. Cada uno de ellos estaba equipado para recoger muestras del suelo marciano y realizar varios experimentos.

El primer experimento consistió en mezclar una muestra de suelo marciano con los gases dióxido de carbono y monóxido de carbono, marcados radiactivamente con carbono-14. Los resultados mostraron que el carbono radiactivo se quedaba incorporado en el suelo, lo que parecía sugerir que había algo en él que lo estaba fijando, del mismo modo que los organismos fotosintéticos fijan el dióxido de carbono atmosférico en la forma de compuestos orgánicos. Sin embargo, cuando el experimento fue repetido tras calentar la muestra a 175 °C, la aparente fijación del carbono se seguía produciendo, algo que no encajaba bien con la probable destrucción de cualquier microorganismo a esa temperatura.

El segundo experimento (también llamado *de intercambio de gases*) se realizó mezclando el suelo de Marte con un medio de cultivo que contenía nutrientes orgánicos similares a los que se utilizan para cultivar bacterias terrestres en cualquier laboratorio. Rápidamente se produjo la liberación de oxígeno, lo que nuevamente parecía sugerir que estaba teniendo lugar un proceso similar a la fotosíntesis. Puesto que, al igual que en el caso anterior, la liberación de oxígeno también se produjo tras calentar la muestra a una temperatura muy elevada, la conclusión fue que el resultado era debido a algún proceso no biológico.

Los resultados más intrigantes se produjeron en el tercer experimento, que también incorporó al suelo marciano una mezcla de nutrientes marcados con carbono-14. En este caso, lo que se observó fue una liberación de dióxido de carbono radiactivo que fue decayendo progresivamente. El resultado era totalmente compatible con la presencia de microorganismos heterótrofos que consumían la materia orgánica disponible en los nutrientes. Además, a diferencia de los dos experimentos anteriores, en este caso, si la muestra de suelo se calentaba previamente, la liberación de dióxido de carbono no se producía. Este hecho causó gran expectación, ya que parecía ser una prueba de la existencia de vida en Marte. La

decepción vino cuando se intentó detectar la presencia de moléculas orgánicas mediante espectroscopía de masas y cromatografía de gases. Los resultados fueron concluyentes: no había ningún signo de la presencia de estas moléculas, algo que parecía incompatible con el hecho de que hubiera vida sobre el planeta.

Sin embargo, estudios posteriores han mostrado que el suelo de Marte contiene abundantes percloratos, un tipo de sal que cuando se calienta es capaz de destruir cualquier molécula orgánica con la que esté en contacto. Puesto que tanto la espectroscopía de masas como la cromatografía de gases requieren un calentamiento previo de las muestras que se van a analizar, era prácticamente imposible que, aunque existieran moléculas orgánicas en la superficie marciana, estas pudieran ser detectadas con esa metodología. En años más recientes, los vehículos Curiosity y Perseverance han demostrado que sí existen moléculas orgánicas en Marte. Por tanto, la interpretación del tercer experimento sigue abierta y, aunque se han mostrado alternativas no basadas en la biología para explicar los resultados, a veces puede ser bonito soñar que quizás la vida en Marte ya fue descubierta en los años setenta por las Viking.

Instrumentación para la búsqueda de vida *in situ*

La mayoría de los biomarcadores que hemos descrito hasta ahora solo pueden detectarse *in situ* mediante el envío de misiones que orbiten alrededor del planeta o satélite que estemos observando y, sobre todo, mediante el uso de *landers* o vehículos con cierta capacidad de desplazamiento (los *rovers*). Para ello, las misiones deben estar equipadas con la maquinaria adecuada para sacar fotografías, realizar análisis mineralógicos, observaciones microscópicas o mediciones de gases, por citar algunos ejemplos. Además, la instrumentación debe

estar totalmente robotizada, ya que, hoy por hoy, solo se han enviado misiones tripuladas a la Luna y tampoco es posible el retorno a la Tierra de muestras de otro cuerpo planetario, nuevamente con la excepción de las rocas lunares. El elevado coste económico que conlleva el incremento de peso o espacio de las misiones espaciales requiere que todos los instrumentos asociados sean lo más ligeros posible, ocupen poco espacio y no necesiten mucha energía para su funcionamiento. Por si todo eso fuera poco, en la mayoría de los casos, las condiciones ambientales de presión, temperatura o radiación en las que deben operar serán extremas y muy diferentes a las terrestres, lo que hace que su diseño suponga un enorme reto técnico y científico que normalmente requiere muchos años de trabajo en los que la resistencia, capacidad operativa, límites de detección y otras propiedades son optimizadas en laboratorios terrestres.

Las técnicas más comunes para la detección de signos de vida son las siguientes:

Espectrometría de masas. Es una técnica analítica muy potente que permite detectar e identificar compuestos orgánicos. Su modo de funcionamiento implica en primer lugar la ionización de la muestra, para después separar las moléculas producidas según su relación masa/carga. De este modo se produce un espectro de masas que proporciona información detallada sobre la composición, peso molecular y estructura de los componentes de la muestra. A pesar de que los espectros obtenidos suelen ser complejos, su gran reproducibilidad convierte esta técnica en un instrumento muy valioso para el análisis *in situ* de muestras planetarias

Cromatografía de gases. Se utiliza para separar los componentes de una muestra en fase gaseosa según su afinidad por el material de relleno de una columna cromatográfica. Una vez inyectada la muestra en la columna, se hace pasar otro gas

que actúa como eluyente, de modo que los componentes que poseen mayor afinidad por el material de la columna son retenidos más fuertemente y tardan más en salir que los que interaccionan más débilmente. Así se obtiene un perfil de tiempos de retención que permite identificar los integrantes de la muestra. Esta técnica, aunque muy potente, tiene la limitación de que las moléculas del material a analizar deben ser lo suficientemente volátiles como para estar en fase gaseosa de forma estable a la temperatura a la que opera usualmente (más de 200 °C).

La necesidad de vaporización se elimina en los análisis atmosféricos, puesto que, en este caso, la muestra ya está en fase gaseosa. Las sondas Huygens y Philae, enviadas a Titán y el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, respectivamente, mostraron la efectividad de la cromatografía de gases para analizar la composición de la atmósfera más próxima a la superficie (sonda Huygens) o incluso del vapor y el polvo levantados por el *lander* que se posó sobre el cometa 67P (sonda Philae). Actualmente existen instrumentos que permiten utilizar la cromatografía de gases en combinación con la espectrometría de masas, de modo que se puede determinar la relación de isótopos estables de muchas moléculas.

Espectroscopía óptica. Se trata de un conjunto de técnicas que implican un tratamiento de las muestras menos agresivo que las anteriores y que permiten realizar análisis sobre su composición elemental y mineralógica. Prácticamente todos los *landers* que se han posado en la superficie de Marte han utilizado espectroscopía de rayos X para analizar el material que recubre el suelo marciano. Cuando se trata de identificar moléculas orgánicas, las técnicas preferidas son la espectroscopía de fluorescencia y la espectroscopía Raman. El principio de la espectroscopía de fluorescencia es que ciertos compuestos orgánicos, cuando son excitados por radiación de baja longitud de onda (como la radiación ultravioleta), pueden emitir

luz de una longitud de onda mayor a la incidente, la cual quedaría registrada en un espectro. Los óptimos de excitación y emisión dependen de la molécula, lo que hace que la espectroscopía de fluorescencia sea útil no solo para detectar la presencia de compuestos orgánicos, sino también para ayudar en su identificación. La especroscopía Raman está basada en la iluminación de la muestra con luz láser de una única longitud de onda. La luz dispersada es recogida y analizada espectroscópicamente. Aunque la mayor parte de esa luz posee la misma longitud de onda que la utilizada durante la iluminación, una pequeña proporción se dispersa a longitudes de onda diferentes, lo que resulta también en la producción de espectros que han mostrado ser muy útiles para detectar biomoléculas en mezclas complejas. Las diferentes técnicas espectroscópicas suelen utilizarse en combinación, de modo que la información proporcionada por cada una de ellas sea complementada por las otras.

Inmunoensayos. Esta metodología está basada en el diseño de moléculas, generalmente anticuerpos o aptámeros, capaces de reconocer de forma muy específica a otras. Los anticuerpos son moléculas proteicas complejas que interaccionan con otras, denominadas *antígenos*, que pueden ser de tipos muy diversos. Los aptámeros son pequeñas cadenas simples de nucleótidos que, al plegarse, generan una superficie de contacto con alta afinidad y especificidad por ácidos nucleicos, proteínas, iones metálicos y otras pequeñas moléculas. Generalmente, ambos se disponen sobre un chip que entra en contacto con la muestra a analizar. Mediante técnicas de marcaje fluorescente es posible comprobar fácilmente si alguno de ellos produce una señal positiva, lo que sería un indicador muy potente de la presencia en la muestra estudiada de la molécula (u otra muy similar) frente a la cual se diseñó el anticuerpo o el aptámero.

En el Centro de Astrobiología de Madrid (CSIC-INTA), en colaboración con otras instituciones del Programa de

Astrobiología de la NASA, se está trabajando en el diseño del instrumento SOLID (Signs of Life Detector), que posee como componente principal un chip con más de 400 anticuerpos diferentes. Entre ellos se encuentran algunos capaces de reconocer los dominios estructurales de algunas proteínas ancestrales que pudieron ser relevantes en el origen de la vida. De este modo, se pretende reducir los sesgos que haya podido introducir la evolución en las propiedades de las proteínas terrestres actuales, facilitando así la detección de estructuras comunes a cualquier tipo de vida. El objetivo es que SOLID pueda embarcarse en una misión a Marte para que procese una muestra de suelo que será expuesta frente al chip de anticuerpos. El problema de esta tecnología es que continúa estando muy sesgada por las propiedades de la vida terrestre y, por tanto, un resultado negativo, por sí solo, nunca debería ser tomado como una prueba absoluta de la no existencia de vida.

La búsqueda de vida remota

Estrellas, exoplanetas y habitabilidad

Ya hemos detallado las condiciones que hacen que un planeta, solar o extrasolar, pueda ser considerado habitable. Muchas de ellas, como la presencia de agua líquida sobre su superficie o la posibilidad de mantener un campo magnético o una tectónica de placas, no pueden ser determinadas fácilmente en el caso de los planetas extrasolares. Sin embargo, las propias tecnologías utilizadas para la detección de estos planetas pueden proporcionarnos información muy valiosa sobre su masa, su radio, la forma de su órbita, el tiempo que tardan en girar alrededor de su estrella, la distancia a la que se encuentran de ella —algo crucial para saber si se encuentran en su zona de habitabilidad—, la composición de su atmósfera en caso de

tenerla y la naturaleza del planeta, es decir, si es de gas o de roca. Toda esta información, combinada con la obtenida sobre la estrella a la que está ligada cada planeta particular —su edad, masa, temperatura superficial, etc.—, nos permite comenzar a especular sobre las posibilidades de que la vida pueda florecer en él.

El descubrimiento de los exoplanetas nos está deparando muchas sorpresas, entre ellas que el tipo de planetas que existen en el sistema solar y la disposición que adoptan quizás no es representativo de lo que existe en otros sistemas planetarios. Pero aún es pronto para determinar si los hallazgos que hemos encontrado observando fuera del sistema solar son la norma o simplemente representan una pequeña muestra sesgada por nuestros métodos de observación.

Atendiendo a la masa, tamaño, cercanía a la estrella, naturaleza del planeta y otras características, los exoplanetas detectados hasta la fecha se clasifican en cuatro tipos principales, algunos de los cuales no están representados en el sistema solar:

Gigantes gaseosos. Son grandes planetas compuestos principalmente por helio o hidrógeno. Al igual que Júpiter y Saturno en nuestro sistema solar, estos planetas no tienen superficies sólidas, sino que están formados por grandes masas de gases que se arremolinan alrededor de su núcleo. Pueden ser mucho más grandes que Júpiter y estar tan cerca de su estrella que completan una vuelta en cuestión de horas. La proximidad a su estrella hace que también reciban una gran dosis de radiación que eleva enormemente su temperatura (hasta miles de grados centígrados), por lo que a veces estos planetas también se denominan *Júpiter calientes*. Hasta su descubrimiento, los modelos para la formación de planetas, basados en la observación del sistema solar, no predecían que gigantes así pudieran hallarse tan cerca de su estrella. De hecho, en el sistema solar, los planetas más cercanos al Sol son rocosos,

mientras que los planetas gaseosos están bastante más alejados. Debido a su gran tamaño y sus órbitas tan estrechas, los exoplanetas de este tipo provocan una atracción sobre sus estrellas que se traduce en una pequeña oscilación capaz de causar un cambio medible en su espectro de luz.

Este tipo de medidas fue lo que facilitó la detección temprana de gigantes gaseosos (unos 1600 confirmados por el momento) mediante el método de la velocidad radial, que detallaremos más adelante. A pesar de su abundancia, es fácil entender que las características de los Júpiter calientes no los hacen muy aptos para la vida. Sin embargo, su estudio es muy interesante de cara a conocer los procesos que determinan la formación de planetas en el universo.

Supertierras. A pesar de su nombre, las supertierras (unas 1600 confirmadas hasta la fecha) no son planetas similares a la Tierra y, de hecho, no se conoce ningún ejemplo similar en el sistema solar. Su definición alude solo a su tamaño (deben poseer al menos dos veces el tamaño de la Tierra y hasta diez veces su masa), sin hacer referencia a otras propiedades como el hecho de si tienen una superficie rocosa o no. Al igual que los gigantes gaseosos, las supertierras suelen orbitar muy cerca de su estrella, por lo que reciben mucha radiación de la misma, lo cual limitaría su habitabilidad.

Planetas terrestres. Son planetas cuyo radio está entre la mitad y dos veces el de la Tierra. Son mundos rocosos, compuestos por rocas, silicatos, agua y carbono, de los que hasta el momento hay algo menos de 200 confirmados. Dentro de esta pequeña muestra, se han encontrado planetas de tipo terrestre a la distancia adecuada de sus estrellas para contener agua líquida. Se estima que entre el 2 y el 12% de las estrellas pueden albergar algún planeta rocoso situado en su zona de habitabilidad. Claramente este tipo de exoplanetas son los que resultan más interesantes de cara a explorar las posibilidades

de vida, aunque aún se necesita mucha investigación para determinar si contienen océanos o atmósferas. Los futuros telescopios espaciales podrán analizar la luz de algunos de ellos, lo que nos proporcionará una mejor comprensión de los mismos.

Planetas neptunianos. Son planetas con un tamaño similar al de Neptuno o Urano, es decir, mucho más grandes que la Tierra y con una relación entre la masa y el volumen diferente: Neptuno tiene unas cuatro veces el radio de la Tierra y casi 17 veces su masa, mientras que Urano, con un radio ligeramente mayor que el de Neptuno, tiene 14 veces la masa de la Tierra. Existen algo más de 1800 planetas neptunianos confirmados hasta la fecha. Su interior puede ser variado, aunque todos suelen tener un núcleo rocoso metálico y una atmósfera compuesta principalmente por hidrógeno y helio, además de otras sustancias volátiles en menor proporción. Se sabe que en Urano y Neptuno estas moléculas volátiles son agua, amoniaco y metano. Todas ellas suelen estar congeladas por las bajas temperaturas del sistema solar exterior, por lo que a estos planetas se los conoce como *gigantes de hielo*, algo que también sería aplicable a los exoplanetas neptunianos. Otra de sus características es que suelen tener gruesas capas de nubes que impiden el paso de la luz, lo que dificulta la observación de su atmósfera.

Se han encontrado exoplanetas que no pueden catalogarse de forma clara en ninguno de estos grupos y es esperable que, según aumente el número de los descubiertos, haya que ampliar el número de categorías de la clasificación. Es difícil aventurar todo lo que puede contener un universo tan inmenso.

Una mención especial también la merecen los exoplanetas que no giran alrededor de ninguna estrella y que parecen contradecir la propia definición de planeta. Son los *planetas errantes*, que orbitan el centro galáctico y cuyo origen es

incierto: ¿se originaron lejos de una estrella, fueron expulsados de esta o son planetas que giraban alrededor de estrellas que ya se han extinguido? Su descubrimiento hace que la definición de los exoplanetas como planetas que giran alrededor de una estrella que no es el Sol sea incompleta. En su lugar, parece mejor definirlos como cualquier planeta situado fuera del sistema solar, gire alrededor de una estrella o no. Los exoplanetas errantes, aunque pueden mantener cierto calor residual interno, no reciben radiación estelar y, por tanto, son cuerpos muy fríos que se considera que es muy poco probable que puedan sostener vida. Por eso, en el contexto de este libro, siempre que hagamos referencia a exoplanetas nos referiremos a los que tienen una estrella madre alrededor de la cual giran.

Y de estrellas hablaremos a continuación, ya que sus características van a determinar en gran parte la posición y extensión de su zona de habitabilidad, así como el tiempo que un planeta dado podría permanecer en ella. Las zonas de habitabilidad son más amplias para las estrellas más luminosas. Sin embargo, estas tienen una vida media tan corta que no asegurarían la permanencia de un planeta en su zona de habitabilidad el tiempo necesario para que pudiera surgir la vida en él. Como ya indicamos, las estrellas más interesantes de cara a albergar planetas habitables serían las enanas rojas que han alcanzado cierta edad, las estrellas amarillas similares a nuestro sol y las enanas naranjas que, debido a la lentitud con la que queman su hidrógeno, tienen una vida muy larga que podría permitir el desarrollo de la vida en sus planetas asociados.

A la caza de planetas extrasolares

La mayoría de los descubrimientos que se han realizado sobre planetas extrasolares han implicado técnicas indirectas. Entre ellas, las más utilizadas son la medición de la velocidad radial

y la detección de tránsitos planetarios. En algunos casos, las observaciones se realizan desde telescopios situados en nuestro planeta, pero cada vez es más normal que impliquen el uso de telescopios espaciales, que observan desde el espacio. Las razones para ello son múltiples. Entre ellas están la eliminación de la contaminación lumínica de la Tierra y de las aberraciones ópticas inducidas por nuestra atmósfera.

Entre los telescopios que realizan observaciones desde la Tierra se incluyen el Large Binocular Telescope Observatory (LBTO), situado en Arizona; el observatorio hispano-alemán de Calar Alto, en Almería; el Very Large Telescope (VLT) de Chile; el Gran Telescopio de Canarias (GTC), situado en Tenerife, y el Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST) situado en el observatorio de La Silla, en Atacama. No podemos olvidarnos del radiotelescopio de Arecibo en Puerto Rico, que tan importantes contribuciones realizó a lo largo del tiempo que estuvo operativo. Desafortunadamente, tuvo que ser desmantelado en 2020 tras los daños estructurales sufridos tras el paso de varios huracanes y tormentas tropicales que llegaron a colapsar su plato principal.

Entre los telescopios espaciales, se encuentra el Hubble, lanzado en 1990 gracias a una colaboración entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la NASA, y que ha realizado numerosas aportaciones al descubrimiento y caracterización de exoplanetas. Posteriormente se lanzaron el telescopio Spitzer (NASA), el satélite CoRoT (Convection, Rotation and Planetary Transits, construido entre la Agencia Espacial Francesa y la ESA), el telescopio Kepler (NASA), el telescopio incluido en el observatorio espacial Gaia (ESA), el Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) de la NASA y, finalmente, el telescopio de infrarrojos James Webb, construido gracias a la colaboración de la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Canadiense (CSA/ASC) y lanzado a finales de 2021.

Entre los *métodos indirectos* utilizados para la detección de exoplanetas, los dos principales son el de la velocidad

radial y el de los tránsitos planetarios. En su conjunto, ambos métodos han descubierto casi el 94% de todos los exoplanetas confirmados hasta la fecha. Otros métodos, en los que no nos detendremos, son el de las microlentes gravitacionales, la astrometría y la medida de la frecuencia de los púlsares. Este último es válido únicamente para la detección de exoplanetas alrededor de las estrellas de neutrones o púlsares.

El método de la *velocidad radial* se basa en el hecho de que cualquier sistema estrella-planeta gira en torno al centro de masas del sistema completo. Aunque estamos acostumbrados a pensar que los planetas giran alrededor de sus estrellas debido a la enorme atracción gravitatoria que estas ejercen, en realidad las estrellas también se ven afectadas —aunque en mucha menor medida— por la masa del planeta. Es fácil entender que este efecto será mayor cuanto más grande sea el planeta y más cerca de su estrella esté situado. En esos casos, la estrella puede experimentar ciertas oscilaciones que la acerquen o la alejen de nosotros. Esos movimientos pueden ser detectados en forma de ligeros cambios en el espectro que, cuando la estrella se acerca, mostrará un desplazamiento hacia el azul, mientras que cuando se aleja lo hará hacia el rojo. Si estos cambios se repiten de forma cíclica se puede empezar a pensar en la existencia de un exoplaneta como causa de los mismos. Puesto que las variaciones del espectro de la estrella van a depender de la masa del planeta que las causa y de su distancia, esta técnica permite estimar el límite inferior de la masa del planeta y el tiempo que tarda en girar alrededor de su estrella. La principal limitación del método es que no permite descubrir planetas con masa similar a la Tierra o inferior.

El método de *detección de tránsitos planetarios* consiste en la medida de la disminución de la luz emitida por una estrella que se produce cuando un planeta que gira a su alrededor se interpone entre ella y la Tierra. Esta técnica, además, proporciona información sobre el periodo orbital del planeta y su

radio. Cuanto mayor sea el tamaño del planeta, mayor será la disminución que cause en el brillo de su estrella y, por tanto, esta técnica detecta más fácilmente planetas grandes. En los últimos años, las mejoras introducidas han facilitado la detección de planetas más pequeños, en muchos casos de un tamaño similar al de la Tierra.

Una gran ventaja de este método es que el análisis mediante espectroscopía de transmisión de la luz emitida por la estrella durante los tránsitos mostrará descensos en ciertas longitudes de onda que indican la presencia de moléculas específicas en la atmósfera del planeta que está transitando, y algunas de esas moléculas podrían ser indicadores de vida. De hecho, cuando se habla de biomarcadores en el contexto de exoplanetas, normalmente se hace referencia a la presencia de moléculas en su atmósfera que podrían haber sido producidas o modificadas por la vida.

Por último, trataremos el tema de la *observación directa* de los exoplanetas, algo que se topa con grandes dificultades debido a la gran diferencia de luminosidad con sus estrellas, cuya luz llega a ocultar la del propio planeta. Un ejemplo muy burdo sería el de encender una bombilla a pleno día en la calle. Su luz apenas sería observable, debido a que está inmersa en una luz de mucha mayor intensidad. La diferencia de luminosidad entre los planetas y sus estrellas es menor en el infrarrojo que en el visible. Por eso la espectroscopía de infrarrojos es el método más utilizado para la observación directa de exoplanetas. Además, es en esta zona del espectro donde se aprecian las líneas de varias moléculas muy relacionadas con la vida, como el agua, el dióxido de carbono, el metano o el ozono.

Aun así, la observación directa, sin combinarla con otro tipo de técnicas, solo sería aplicable a planetas gigantes de reciente formación, que todavía conservaran suficiente calor residual como para realizar una emisión detectable en el infrarrojo. Para realizar la observación directa de planetas más

pequeños se hace necesario ocultar el brillo de la estrella, y para ello se emplean dos técnicas: la coronografía y la interferometría de cancelación.

La *coronografía* consiste en un sistema de máscaras, prismas, detectores y espejos autoflexibles que se combinan para suprimir la luz de las estrellas y hacer más clara la luz del planeta. Todo el sistema puede ser instalado dentro del propio telescopio destinado a la observación. Por su parte, la *interferometría de cancelación* anula la luz procedente de la estrella mediante la interferencia causada por otras radiaciones emitidas desde diferentes telescopios espaciales. Por último, una tecnología que está en desarrollo y que aún no se ha probado en ninguna misión es la de los *ocultadores externos*, que son pequeñas naves espaciales que se desplegarían en el espacio a la distancia adecuada de un telescopio espacial, de modo que la luz de la estrella se llegara a bloquear.

Una historia de descubrimientos

En 1992, Aleksander Wolszczan y Dale Frail anunciaron el descubrimiento de dos planetas rocosos que orbitan alrededor de un púlsar en la constelación de Virgo. Debido a que esos planetas estaban siendo bombardeados de forma constante por la radiación de neutrones emitida desde su estrella, era imposible que en ellos se pudieran mantener moléculas orgánicas de forma estable. Hubo que esperar a 1995 para que, utilizando el método de la velocidad radial, Michel Mayor y Didier Queloz realizaran el descubrimiento del primer planeta, actualmente denominado *Dimidium*, que orbita una estrella similar al Sol. El planeta, con la mitad del tamaño de Júpiter, gira muy próximo a su estrella, por lo que no estaría en su zona de habitabilidad. Se ha estimado que la temperatura de Dimidium podría ser de unos 1000 °C, totalmente incompatible con la existencia de agua líquida.

En 1999 se observó el primer exoplaneta en tránsito, situado en la constelación de Pegaso, el HD 209458 b. El planeta, con una masa de aproximadamente 220 veces la terrestre y un tamaño mayor que el de Júpiter, está tan cerca de su estrella que solo tarda tres días y medio en completar una vuelta a su alrededor. El análisis posterior de su atmósfera mediante espectroscopía de transmisión indicó que estaba compuesta por agua, oxígeno, nitrógeno y carbono. Dada la proximidad a su estrella, la atmósfera de este planeta se está liberando al espacio como consecuencia de la intensa radiación recibida. También en 1999 se descubrió el primer sistema multiplanetario en la estrella Upsilon Andromedae, perteneciente a la constelación de Andrómeda.

Hubo que esperar hasta 2001 para que se descubriera un planeta que orbita aproximadamente a la misma distancia de su estrella que la Tierra del Sol. El planeta, que es casi seis veces más masivo que Júpiter, es el primero que se encontró en la zona de habitabilidad de su estrella, lo cual no significa que tenga vida; simplemente está situado en una región que permite el mantenimiento de agua líquida de forma estable sobre su superficie.

El telescopio espacial de la NASA Spitzer se lanzó en 2003 y estuvo operativo hasta 2020. Aunque no fue diseñado para buscar exoplanetas, sus instrumentos infrarrojos lo convirtieron en un excelente observador de estos. Gracias al Spitzer se pudo realizar la primera observación directa de la luz infrarroja emitida por dos exoplanetas.

El descubrimiento de exoplanetas creció exponencialmente con el lanzamiento del telescopio espacial Kepler en marzo de 2009. Esta misión se diseñó específicamente para inspeccionar una región de la Vía Láctea que contiene unas 150 000 estrellas, con el fin de descubrir planetas situados en su zona de habitabilidad. Después de que la segunda de las cuatro ruedas giroscópicas de Kepler fallara en 2013, el telescopio terminó su misión principal, pero los datos ya

obtenidos, combinados con nuevas observaciones, permitieron seguir detectando exoplanetas hasta llegar a un total de más de 2700 confirmados, muchos de ellos probablemente rocosos y con una composición similar a la Tierra. Finalmente, en 2018, el telescopio Kepler cortó las comunicaciones con la Tierra después de quedarse sin combustible, finalizando así su exitosa misión científica.

Utilizando el método de la velocidad radial desde observatorios situados en nuestro planeta, en 2016 se descubrió un planeta, un poco más masivo que la Tierra, que orbita alrededor de Próxima Centauri, la estrella más cercana a nuestro sol. El planeta, que se denominó *Próxima b*, está situado en la zona de habitabilidad de su estrella, lo que lo convierte en el exoplaneta habitable más cercano a nosotros. Pero lo de cercano, en el espacio, puede ser muy lejano en el contexto de una vida humana. De hecho, Próxima b está situado a 4,2 años luz, lo que, utilizando la tecnología actual, significa que una misión para llegar hasta él implicaría varias generaciones de humanos que tendrían que nacer y vivir en el espacio.

En 2017, las observaciones realizadas por el telescopio TRAPPIST —del mismo nombre que la estrella que iba a observar— y el telescopio espacial Spitzer permitieron aumentar el censo de exoplanetas que orbitan alrededor de la enana roja TRAPPIST-1 hasta siete. Todos ellos son de un tamaño similar a la Tierra y algunos están en la zona de habitabilidad. En el futuro sabremos si estos mundos tienen agua líquida, atmósfera y otras condiciones que podrían hacernos soñar con la existencia de vida.

En 2018 se lanzó el Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) como sucesor del telescopio espacial Kepler para descubrir exoplanetas en órbita alrededor de enanas rojas. Su primera imagen científica llegó en agosto de 2018, con un retrato de la Gran Nube de Magallanes, una de las pequeñas galaxias satélite de nuestra Vía Láctea. En 2019 descubrió sus tres primeros exoplanetas confirmados.

Y ya en diciembre de 2021 tuvo lugar el lanzamiento del telescopio espacial infrarrojo James Webb. Su principal objetivo es el estudio de todas las fases de la historia del universo, desde los primeros resplandores luminosos tras el Big Bang, pasando por la formación de galaxias, estrellas y planetas, hasta la evolución de nuestro propio sistema solar. El 12 de enero de 2023, este telescopio confirmó el descubrimiento de su primer exoplaneta, un mundo rocoso, de tamaño similar a la Tierra, pero con una temperatura tan alta que haría imposible la vida en él.

Los nombres de los exoplanetas pueden parecer largos, complicados y poco intuitivos. Sin embargo, existe una lógica detrás del sistema de nomenclatura utilizado que permite catalogar de forma exacta los miles de planetas descubiertos y todos los que es previsible que se descubran en el futuro. Utilizar nombres propios como Venus o Marte podía ser válido cuando nuestro conocimiento del cosmos se limitaba al sistema solar, pero puede resultar poco efectivo cuando hablamos de miles de planetas.

La primera parte del nombre de un exoplaneta suele indicar el telescopio que hizo posible su descubrimiento. El número es el orden en que la estrella fue catalogada y la letra minúscula representa el planeta. El primer planeta detectado en una estrella particular siempre se llama b, y los planetas siguientes se llaman c, d, e, f, y así sucesivamente. La estrella que orbita el exoplaneta suele ser la A del sistema. Aunque no suele incluirse de forma explícita, puede ser útil hacerlo cuando el sistema contiene varias estrellas, que a su vez se designarían como B, C o posteriores. Un ejemplo es Kepler-16b, donde "Kepler" es el nombre del telescopio que observó el planeta, "16" es el orden en que se catalogó la estrella y "b" significa que es el planeta más cercano a esa estrella. A veces, en lugar de utilizar el nombre del telescopio se utiliza el nombre de la estrella. Por ejemplo, Próxima b sería el primer planeta detectado alrededor de Próxima Centauri. Por último, en

algunos casos aislados, los exoplanetas pueden tener nombres propios, como el ya mencionado Dimidium.

¿Cuáles son los biomarcadores de los planetas extrasolares?

Como ya hemos indicado, dada la lejanía de los planetas extrasolares, es imposible realizar exploraciones *in situ*. Tenemos que conformarnos con el análisis de su atmósfera y comprobar si en ella existe alguna molécula que pueda ser interpretada como un signo de vida. Para ello, la espectroscopía de la luz emitida —procedente del propio planeta o de su estrella— es la herramienta más valiosa. Como siempre que hablamos de biomarcadores, nuestro punto de partida es la vida terrestre y, en ese sentido, tenemos que preguntarnos: ¿qué signos ha dejado la vida en nuestra atmósfera?

En la atmósfera terrestre, las moléculas que han aumentado considerablemente su concentración como consecuencia de la acción biológica son el oxígeno, el ozono y el metano. Otras moléculas, como el agua y el dióxido de carbono, también son producidas por la vida, pero pueden tener también su origen en otras muchas fuentes abióticas, por lo que no se consideran biomarcadores.

El oxígeno de la atmósfera terrestre es generado, en su mayor parte, durante la fotosíntesis. El ozono, aunque no se forma directamente por los seres vivos, sino por la acción de la radiación ultravioleta sobre el oxígeno, es detectable en concentraciones muy bajas y, por eso, también es considerado un buen biomarcador. Por último, el metano puede tener varias fuentes: se produce en los procesos derivados de la digestión de los alimentos en muchos animales, así como resultado de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. Además, también existe un grupo de bacterias —metanogénicas— que producen metano como un subproducto de su metabolismo. El potencial uso de estas tres moléculas como

biomarcadores hace que sean las que con más esperanza se buscan en las atmósferas de los planetas extrasolares cuando se trata de evaluar sus posibilidades de albergar vida. Sin embargo, es necesario ser muy cuidadoso en la interpretación de este tipo de datos, ya que la composición de una atmósfera puede variar según numerosos factores que no están relacionados con la vida. Es crítico que las observaciones sean interpretadas con la ayuda de modelos atmosféricos que tengan en cuenta la energía que el planeta recibe de su estrella y los procesos químicos y geológicos que ocurren en él, algo que puede ser difícil de realizar en el caso de los exoplanetas.

Por ejemplo, el oxígeno, además de por la vida, también puede ser generado por la fotodisociación del vapor de agua atmosférico provocada por la acción de la luz ultravioleta. Por esta razón, encontrar oxígeno en la atmósfera de un planeta no debería ser interpretado ineludiblemente como un signo de vida en él. En el otro lado de la moneda, la Tierra, durante gran parte de su historia, fue un planeta poblado por vida microscópica, pero que carecía de oxígeno en su atmósfera, a pesar de que este se producía en grandes cantidades gracias a la fotosíntesis realizada por las cianobacterias. No fue hasta hace unos 2000 millones de años, cuando todo el hierro disuelto en los océanos había sido oxidado, cuando el oxígeno comenzó a estar presente en cantidades apreciables en la atmósfera terrestre. Podría haber planetas en los que hubiera vida y nunca llegara a surgir un proceso como la fotosíntesis. Por tanto, buscar oxígeno en sus atmósferas como un signo de vida sería algo totalmente inútil.

El metano también puede ser producido abióticamente en sistemas hidrotermales o en ciertos ambientes planetarios con una atmósfera rica en dióxido de carbono que recibe fuerte radiación ultravioleta. También puede permanecer durante mucho tiempo atrapado en unas estructuras llamadas *clatratos*, desde las que puede ser liberado después progresivamente a la atmósfera.

Para algunos científicos, la evidencia más robusta de vida detectable en la atmósfera de un planeta sería la presencia simultánea de una molécula oxidante y otra reductora, ya que, si no hay una fuente que las esté produciendo continuamente, ambas se combinarían y desaparecerían. Por ejemplo, la mezcla de oxígeno y metano rápidamente produciría dióxido de carbono y agua. Que estos gases se mantengan en concentraciones estables en la atmósfera terrestre indica que debe haber una fuente de emisión constante de los mismos y esa fuente, en el caso de la Tierra, no es otra que la vida.

CAPÍTULO 5

Nuestro vecindario

En medio de todo está el Sol. Pues, ¿quién en este bellísimo
templo pondría esta lámpara en otro lugar mejor,
desde el que se pudiera alumbrar todo?
NICOLÁS COPÉRNICO

El conjunto del sistema solar

Posiblemente existe un gran número de escenarios favorables para la vida en el universo, pero, por el momento, los únicos lugares accesibles a la exploración *in situ* son los planetas y lunas de nuestro sistema solar. Este contiene ocho planetas: los rocosos interiores (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) y los exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). De estos últimos, Júpiter y Saturno se incluyen en la categoría de gigantes gaseosos, mientras que Urano y Neptuno lo hacen en la de gigantes de hielo. Más allá de Neptuno, existen otros mundos más pequeños, los planetas enanos, entre los que se encuentra Plutón.

Las lunas —también conocidas como *satélites naturales*— orbitan alrededor de los planetas y asteroides. La Tierra tiene solo una luna, pero hay más de 200 en el sistema solar. De hecho, solo los planetas Mercurio y Venus no tienen lunas, mientras que Saturno y Júpiter poseen un buen número de ellas. Las lunas tienen muchas formas, tamaños y tipos: algunas tienen atmósferas e incluso océanos ocultos bajo su superficie. En algunos casos se formaron a partir de los discos

de gas y polvo que circulaban alrededor de sus planetas en el momento que estos se formaron. Otras, sin embargo, fueron capturadas por la órbita del planeta al que ahora están asociadas, siendo así desplazadas de su lugar de origen. La luna terrestre parece que se formó debido a un gigantesco impacto que recibió nuestro planeta y que arrancó un gran pedazo de su corteza y su manto. El material sustraído a la Tierra comenzó a girar alrededor de ella dando lugar a la luna que vemos brillar todas las noches en nuestros cielos.

Mercurio es el planeta más pequeño de nuestro sistema solar y el más cercano al Sol. Su radio mide unos 2400 kilómetros. Debido a su cercanía al Sol, recibe una gran cantidad de radiación, lo que hace que sus temperaturas diurnas alcancen los 430 °C. Sin embargo, debido a la bajísima densidad de su atmósfera, durante la noche, el calor escapa rápidamente de la superficie, causando un descenso térmico que puede llegar hasta los –180 °C. Mercurio podría tener hielo de agua en sus polos norte y sur, dentro de cráteres profundos situados en regiones que están permanentemente a la sombra. Es fácil entender que, debido a sus temperaturas tan extremas y las elevadas dosis de radiación que recibe, es altamente improbable que pueda existir vida en Mercurio.

Venus es el segundo planeta más cercano al Sol, uno de nuestros vecinos colindantes que, debido a las similitudes en tamaño y densidad con la Tierra, en ocasiones ha sido descrito como nuestro gemelo. Sin embargo, las diferencias entre ambos superan ampliamente las propiedades que tienen en común. Para empezar, Venus tiene una atmósfera mucho más densa que la nuestra, que ejerce una presión en superficie similar a la que encontraríamos a un kilómetro y medio bajo los océanos terrestres. Está compuesta por dióxido de carbono y contiene gruesas nubes amarillentas de ácido sulfúrico. Esta espesa atmósfera provoca un efecto invernadero muy intenso que hace que Venus sea el planeta más caliente de nuestro sistema solar, con una temperatura en superficie

de unos 460 °C. Otra diferencia con la Tierra es que Venus gira sobre su eje mucho más lentamente y en sentido contrario a como lo hace nuestro planeta, es decir, en Venus el Sol sale por el oeste y se pone por el este. El tiempo que necesita para completar una vuelta alrededor de sí mismo es de 243 días terrestres, más de lo que tarda en girar alrededor del Sol (225 días terrestres), lo que hace que un día en Venus sea más largo que un año.

Venus fue el primer planeta explorado por una nave espacial, la Mariner 2 de la NASA. Desde entonces, numerosas misiones han mostrado que posee una superficie joven, surcada por montañas y volcanes, algunos de los cuales podrían estar todavía activos. Su exploración detallada es muy difícil por las altísimas temperaturas que destruyen rápidamente los módulos de aterrizaje. Venus es muy hostil para la vida, pero algunos científicos han teorizado que podría existir algún tipo de vida muy simple en sus nubes más altas, donde la temperatura y la presión son más similares a las de la superficie terrestre. En septiembre de 2020 un equipo científico comunicó la existencia de fosfina en las nubes altas de Venus. Dado que en la Tierra este gas se asocia a la presencia de microorganismos en ambientes en los que no hay oxígeno, el anuncio provocó un gran revuelo, llegando incluso a afirmarse en algunos círculos que el hallazgo podría ser una prueba de la existencia de vida en Venus. A día de hoy, los resultados no han podido ser confirmados y, como sucede con otros biomarcadores, la fosfina, en caso de existir en la atmósfera de Venus, también podría tener su origen en procesos geoquímicos que nada tuvieran que ver con la vida.

Júpiter, el quinto planeta en distancia al Sol, tiene un radio de unos 70 000 kilómetros. Es, con diferencia, el planeta más grande del sistema solar, con una masa mayor que la de todos los demás planetas juntos. El descubrimiento, realizado por Galileo Galilei en 1610, de que Júpiter tenía más lunas que la Tierra contribuyó enormemente a hacernos ver que

quizás nuestro planeta no era el más importante en el universo. Actualmente sabemos que Júpiter tiene 79 lunas, su periodo de rotación es el más corto del sistema solar y tarda unos 12 años terrestres en completar una vuelta alrededor del Sol. Su eje apenas está inclinado, lo que significa que el planeta gira casi en posición vertical y, por tanto, no tiene estaciones extremas.

Al ser un gigante gaseoso, Júpiter no tiene una verdadera superficie. Está formado principalmente por remolinos de hidrógeno y helio en forma gaseosa o líquida. Una nave espacial no tendría dónde aterrizar, pero tampoco podría atravesarlo debido a las altísimas presiones y temperaturas del interior del planeta. Mientras que en la parte más externa la temperatura es de unos –110 °C, cuando se profundiza, la presión y la temperatura aumentan tanto que el hidrógeno gaseoso se convierte en líquido, originando así un gigantesco océano no acuoso. A profundidades aún mayores, ese líquido puede hacerse conductor de la electricidad, generando corrientes eléctricas que podrían ser las responsables del potente campo magnético del planeta. Aún no está claro si existe un núcleo central de material sólido o no. Casi con total seguridad Júpiter no es un lugar idóneo para la vida. Sin embargo, no sucede lo mismo con algunas de sus lunas.

Al igual que Júpiter, Saturno, el sexto planeta más alejado del Sol, es un gigante gaseoso compuesto principalmente por hidrógeno y helio. La característica más distintiva son sus anillos, formados por miles de millones de pequeños trozos de hielo y roca recubiertos de otros materiales. En el interior de Saturno existe un núcleo denso, formado por metales como el hierro y el níquel, que está recubierto de material rocoso solidificado por la intensa presión y calor. También posee un océano de hidrógeno líquido, pero de dimensiones menores al de Júpiter. Saturno posee 83 lunas, de las cuales Encélado y Titán son lugares muy prometedores para la búsqueda de vida.

A continuación, dedicaremos unas líneas a los gigantes de hielo, Urano y Neptuno. Urano fue descubierto en 1781 por el astrónomo William Herschel. Fue el primer planeta descubierto con la ayuda de un telescopio. Neptuno no lo fue hasta 1846, aunque su existencia ya había sido predicha gracias a cálculos matemáticos. En ambos gigantes de hielo, la mayor parte de su masa está formada por un denso fluido de materiales helados. En su capa más externa, las temperaturas rondan los –200 °C, pero aumentan tremendamente (al mismo tiempo que lo hace la presión) según nos adentramos en su interior. Ambos poseen un núcleo rocoso en cuyas proximidades se pueden alcanzar los 5000 °C. Entre ese núcleo y las nubes heladas externas se cree que en Neptuno podría haber un océano de agua muy caliente, que no llegaría a hervir debido a las elevadas presiones que existen en el interior del planeta.

Hemos dejado para el final a Marte, el cuarto planeta en distancia al Sol, que se formó casi al mismo tiempo que la Tierra. En épocas remotas, ambos compartían muchas características, como la presencia de una atmósfera y abundante agua líquida en superficie. Sin embargo, en cierto momento, los dos planetas siguieron rumbos distintos, que convirtieron a Marte en un desierto árido y helado, mientras que la Tierra se transformó en un planeta más cálido, con grandes océanos superficiales, en el que la vida pudo florecer.

La posibilidad de vida en Marte

Durante mucho tiempo, cuando se hacía referencia a los posibles seres de otros mundos, se hablaba genéricamente de los marcianos. Y es que la creencia de la existencia de vida superior en Marte ha poblado el imaginario popular desde que las observaciones astronómicas mostraron que este planeta era en muchos aspectos similar a la Tierra. A finales del siglo XVIII,

los hermanos Caroline y William Herschel revelaron que Marte poseía polos helados y que sus días eran solo algo más largos que los nuestros. También afirmaron que Marte tenía una atmósfera y que, por tanto, sus posibles "habitantes" disfrutaban de unas condiciones parecidas a las de la Tierra, algo que dio alas a la imaginación de muchas personas, que llegaron a imaginar la existencia de grandes civilizaciones en el planeta. Aunque ya describimos en el primer capítulo que la idea de la existencia de otros mundos habitados se remonta a muy antiguo, por primera vez esa vida sitúa en un lugar concreto que podemos observar desde la Tierra con nuestros telescopios.

Un siglo más tarde, en 1877, el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli proclamó haber observado en Marte una gigantesca red de líneas que cruzaban su superficie, a las que denominó *canali*. La palabra italiana fue traducida al inglés por *channels*, que se emplea para designar cursos artificiales de agua, reafirmándose así la idea de la existencia de civilizaciones en Marte, que podían incluso llevar a cabo importantes obras de ingeniería. Parece que Schiaparelli ni siquiera llegó a afirmar que sus *canali* contuvieran agua, pero sus observaciones fueron suficientes para desatar la imaginación de muchas personas, entre ellas la de un joven graduado de Harvard llamado Percival Lowell. Tras conocer los trabajos de Schiaparelli, Lowell orientó su actividad hacia la astronomía, llegando a construir un observatorio en Flagstaff (Arizona) que aún está operativo.

Como a veces se dice, "uno ve lo que quiere ver" y, en el caso de Lowell, eso le llevó a informar de la existencia de unos 200 canales en Marte que, según él, servían para llevar agua desde los polos hasta las zonas más secas del planeta. Marte parecía ser un planeta que se estaba secando y los canales eran un desesperado intento de sus habitantes para paliar esa terrible situación. Lo que Lowell no sabía es que Marte se había convertido en un desierto hacía mucho tiempo, en una época en la que no había ningún habitante que pudiera

construir canales para distribuir el agua. ¿Dónde están los canales de Marte? ¿Por qué ahora ya nadie los ve? De hecho, incluso en la época de Lowell muchos astrónomos no fueron capaces de visualizarlos. Parece que fueron simplemente el resultado de las ganas de creer en un Marte habitado combinadas con las deficiencias ópticas de los telescopios de la época.

A pesar de las críticas, la creencia en una posible civilización marciana quedó muy arraigada en la sociedad, algo a lo que sin duda contribuyó la abundante literatura de ciencia ficción que tiene como escenario ese planeta. *La guerra de los mundos* (1898) de Herbert George Wells, *Crónicas marcianas* (1950) de Ray Bradbury o *Las arenas de Marte* (1951) de Arthur C. Clarke nos muestran las ilusiones y los temores que la humanidad ha puesto en el planeta rojo.

La exploración de Marte

La ilusión de encontrar alguna civilización sobre la superficie de Marte se dio de bruces con la realidad que nos mostraron las fotografías enviadas por la primera misión que sobrevoló el planeta en 1965: la Mariner 4. En ellas, Marte aparece con una superficie desértica, cubierta de un polvo rojizo, sin ningún rastro de canales, pero con abundantes huellas del impacto de meteoritos y asteroides, un signo de que el planeta probablemente era geológicamente inactivo y carecía de una tectónica de placas que reciclara su corteza. Las medidas de la presión atmosférica y la temperatura mostraron que Marte, además, era un lugar extremadamente frío y con una atmósfera muy tenue, todo lo cual parecía ser incompatible con la existencia de vida.

Posteriormente ha habido otras muchas misiones a Marte. Algunas, como Mars Global Surveyor, Mars Odyssey, Mars Express o Mars Reconnaissance Orbiter, se han mantenido orbitando alrededor del planeta, recopilando datos sobre

la composición de su atmósfera y cartografiando su superficie con un nivel de precisión altísimo. Además de los orbitadores, también hay instrumentos que se han posado sobre la superficie de Marte sin llegar a desplazarse por ella. Más recientemente, también se han conseguido enviar varios vehículos capaces de moverse en una pequeña área alrededor de su zona de aterrizaje. En general, los principales objetivos de las misiones a Marte son la caracterización de su clima y geología, el estudio de la historia del agua en el planeta, la búsqueda de signos de vida pasada o presente y la preparación para la futura exploración humana.

Entre los módulos de aterrizaje, los primeros que se enviaron a Marte son los dos que componían la misión Viking (1976), cuyo principal objetivo era analizar la posibilidad de vida en el suelo marciano. Y es que, aunque el sueño de encontrar vida inteligente pronto se desvaneció, quedó la esperanza, aún presente, de encontrar vida microscópica. Ya hemos hablado de los experimentos realizados por esta misión que, aunque a día de hoy siguen generando cierta controversia, parecen descartar la existencia de vida microbiana en el suelo de Marte basada en un metabolismo similar al de las bacterias terrestres.

Hubo que esperar a 1997 para que un *rover*, el Sojourner de la misión Pathfinder, comenzara a desplazarse por la superficie marciana, iniciando así una nueva era de exploración en la que los límites del territorio a explorar se fueron haciendo cada vez más amplios. El *rover* Sojourner, de apenas 11 kilogramos de masa, además de caracterizar diversos parámetros sobre la composición de las rocas y la atmósfera marcianas, nos envió una completísima colección de fotografías del entorno por el que se desplazaba. Más adelante, este tipo de fotografías se han hecho habituales cada vez que un nuevo instrumento aterriza en Marte, hasta el punto de que los paisajes de este planeta pueden resultarnos casi tan familiares como los terrestres.

El *rover* Sojourner fue seguido por otros, como el Spirit y el Opportunity (2004). Ambos aterrizaron en lados opuestos del planeta y sobrepasaron con creces las previsiones más optimistas sobre su tiempo de funcionamiento, estimado en unos tres meses. Sin embargo, el Spirit estuvo operativo durante seis años y el Opportunity, catorce, hasta que una tormenta global de polvo produjo el fallo de los paneles solares que alimentaban sus baterías. Estos *rovers* mostraron la existencia en Marte de rocas que en la Tierra suelen formarse en condiciones de humedad, un hecho de gran relevancia para determinar si el planeta contuvo agua en el pasado. En 2011 se lanzó la misión Mars Science Laboratory (MSL), que llevaba asociado el *rover* Curiosity, el cual todavía continúa explorando su lugar de aterrizaje, el cráter Gale. Entre las investigaciones llevadas a cabo por el Curiosity, está la caracterización de los posibles compuestos orgánicos existentes en la atmósfera y el suelo de Marte y la investigación sobre el origen, biótico o abiótico, de algunos gases como el dióxido de carbono o el metano. Además, el Curiosity también lleva a bordo una estación meteorológica (Rover Environmental Monitoring Station, o REMS) liderada por el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA) y diseñada enteramente en España.

Desafiando todas las previsiones, dadas las enormes dificultades asociadas a la empresa de enviar un instrumento a otro planeta, la primera misión a Marte diseñada por la Administración Espacial Nacional de China (CNSA), la Tianwen-1, consiguió posar con éxito el *rover* Zhurong sobre la superficie marciana en mayo de 2021. Poco antes, en febrero del mismo año, aterrizaba el *rover* Perseverance, perteneciente a la misión Mars 2020 de la NASA y que también llevaba a bordo una estación meteorológica española. Esta misión, además, iba equipada con un pequeño helicóptero, el Ingenuity, que es el primer instrumento que ha conseguido despegar en la superficie de Marte, algo que no es nada trivial, dada la baja densidad de su atmósfera.

Entre los objetivos científicos de la misión Mars 2020 está la determinación de las condiciones de habitabilidad y la búsqueda de biomarcadores en el cráter Jezero, lugar en el que aterrizó el Perseverance y que se cree que estuvo cubierto por un lago de agua hace 3500 millones de años. Además, se están recogiendo y almacenando muestras de tierra y roca que serán traídas a la Tierra en una misión posterior y, mediante el instrumento MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment), se está investigando la posibilidad de generar oxígeno *in situ* en Marte a partir del dióxido de carbono de la atmósfera.

Algunas características del Marte actual

Actualmente, la superficie de Marte se asemeja más a un desierto que a un oasis. Alguien podría argumentar que incluso en los desiertos terrestres hay vida y tendría razón, pero es que los desiertos de Marte, aunque similares en aspecto a los que existen en la Tierra, en realidad son muy diferentes. La clave está en la atmósfera marciana, que es tremendamente tenue, por lo que la presión que ejerce sobre su superficie es inferior al 1% de la terrestre. Está compuesta en más de un 95% por dióxido de carbono, un gas que en cantidades suficientes puede ejercer efecto invernadero, pero que, cuando la atmósfera es tan ligera como la marciana, es incapaz de mantener el calor recibido del Sol. Como resultado, la temperatura media de Marte está entre –50 °C y –55 °C, totalmente incompatible con la presencia de agua estable en su superficie. Cuando, en verano, las temperaturas se elevan por encima del punto de congelación del agua, la baja presión atmosférica hace que esta se evapore rápidamente. Otro problema para la vida que presenta la atmósfera de Marte es que no posee oxígeno en cantidad suficiente para generar una capa de ozono que pudiera proteger las moléculas biológicas del daño causado por la radiación ultravioleta. Y más grave aún,

Marte tampoco posee un campo magnético que haga de escudo frente a los dañinos rayos cósmicos.

Hemos mencionado el verano marciano. Y sí, eso quiere decir que Marte tiene estaciones. Al igual que en la Tierra, ese hecho radica en la inclinación de su eje. Sin embargo, puesto que, al estar más alejado del Sol, el año marciano es más largo que el terrestre (dura 668 días), las estaciones en Marte son más largas. Durante el invierno, las temperaturas en el polo sur pueden alcanzar los –130 °C, provocando que el dióxido de carbono atmosférico se congele, algo que genera un importante descenso de la presión atmosférica en esa zona. En esos mismos momentos, en el verano del polo norte sucede lo contrario: el hielo se funde y el dióxido de carbono se libera a la atmósfera, aumentando así su densidad. De ese modo, de forma cíclica, se generan grandes diferencias de presión entre los dos polos del planeta, las cuales pueden desencadenar intensas tormentas de polvo que tiñen el cielo marciano de un color amarillo rojizo.

Uno de los hechos más intrigantes cuando se observa la superficie de Marte es la gran diferencia que existe entre el hemisferio norte y el sur. Para empezar, los cráteres de impacto son mucho más abundantes en el sur, algo que sugiere que su corteza es más antigua que la del norte, la cual en gran parte está cubierta por lava solidificada que ha cubierto los cráteres más antiguos. Además, la corteza del hemisferio norte es mucho más delgada que la del sur, algo para lo que, a día de hoy, aún no existe una explicación válida. Al igual que en la Tierra, el vulcanismo fue muy importante en las primeras etapas de la formación de Marte. Prueba de ello es el inmenso domo de Tharsis, con todos sus volcanes, entre los que destaca el monte Olimpo, con una altura de 26 kilómetros. La magnitud sorprende aún más cuando se tiene en cuenta que la superficie de Marte es aproximadamente un cuarto de la terrestre. Otro accidente geográfico que llama poderosamente la atención es el inmenso cañón denominado

Valles Marineris, con una longitud similar a la de los Estados Unidos y casi cuatro veces más profundo que el Gran Cañón del Colorado.

Según Marte se fue enfriando, algo que sucedió más rápido que en la Tierra debido a su menor tamaño, la frecuencia del vulcanismo decreció. Sin embargo, todavía es posible observar indicios de emisiones de lava ocasionales y recientes. Esto sugiere que el planeta todavía podría conservar parte de su calor interno, algo muy interesante de cara a la posibilidad de que el hielo del subsuelo pudiera fundirse dando lugar a depósitos de agua líquida. Aunque Marte pueda conservar parte de su calor residual, su rápido enfriamiento hace que no posea un núcleo fundido como el que posee la Tierra y, por lo tanto, que carezca de campo magnético, algo que, como veremos después, pudo tener drásticas consecuencias en su historia.

¿Cómo era Marte en la antigüedad y por qué cambió tanto?

Si Marte se formó al mismo tiempo que la Tierra, en una región próxima a ella, y ambos son planetas rocosos, es legítimo conjeturar que quizás inicialmente tuvieron historias similares. Posiblemente, en ambos casos, la acumulación de planetesimales produjo un intenso calor interno, acrecentado por la desintegración de elementos radiactivos. Los volcanes son la forma más sencilla de que ese calor se libere al exterior, algo que suele ir acompañado por la liberación de enormes nubes de gas, lava y otros materiales. Esas emanaciones de los volcanes pueden causar un intenso efecto invernadero que habría sido el responsable de que, tras la formación del planeta y el enfriamiento de su corteza, Marte, al igual que la Tierra primitiva, mantuviera temperaturas más altas que las que le corresponderían por su distancia al Sol. Debido a la mayor densidad de la

atmósfera marciana primitiva, la presión ejercida por esta también sería mayor que la que existe ahora, todo lo cual, combinado, probablemente permitiría la permanencia de agua líquida en forma estable sobre su superficie. Lo que se desconoce es durante cuánto tiempo se mantuvo esa agua y si este fue suficiente para el desarrollo de la vida. Pero comencemos por repasar las evidencias que tenemos de que Marte no siempre fue el desierto árido que es actualmente.

Los primeros orbitadores que sobrevolaron Marte ya nos mostraron en sus fotografías signos claros de lo que parecía ser el curso de ríos que podrían tener una antigüedad de unos 3000 millones de años. A partir de esa fecha parece que el agua no volvió a discurrir por ellos. Otras fotografías con mejor resolución, tomadas por orbitadores más recientes, muestran incluso huellas de la erosión causada por el agua en algunos cráteres. Cuando las rocas de algunos de esos cráteres han sido analizadas, se han encontrado diversos minerales hidratados, como arcillas, sulfatos y silicatos, cuya formación, al menos en la Tierra, requiere un entorno acuoso.

Uno de los descubrimientos del Opportunity fue la presencia de pequeñas esferas, denominadas por su forma *blueberries* (arándanos), que parecían haber emergido tras la erosión de las rocas subyacentes. Las esferas estaban compuestas por un mineral rico en hierro, la hematita, mientras que las rocas de su alrededor lo estaban por otro rico en sulfuro, la jarosita. Ambos minerales se forman en aguas ácidas y saladas, lo que sugiere que en algún momento de su historia hubo agua circulando en esa zona. Más adelante, el Curiosity descubrió que algunas de las rocas del cráter Gale también contenían minerales para cuya formación se requería agua, pero menos ácida y con menos sales que la que se cree que discurrió en el área de exploración del Opportunity.

Esto nos revela que la región explorada por el Curiosity probablemente contiene sedimentos antiguos que se formaron cuando el agua de Marte todavía conservaba su pureza. Sin embargo, cuando el agua comenzó a escasear, esta se hizo más ácida y salada, favoreciendo la formación de otro tipo de minerales, que son los que se encuentran en la zona explorada por el Opportunity. Más recientemente, los datos enviados por el Perseverance corroboran que el cráter Jezero fue un antiguo lago en el que desembocaba un río que formó un delta con sedimentos dispuestos en una forma similar a la encontrada en los deltas terrestres.

En algunos lugares de Marte también se han encontrado evidencias de que alguna vez el agua fluyó por ellos, no de forma suave como sucede en los ríos, sino en forma tumultuosa y torrencial, posiblemente debido a la emergencia repentina de grandes reservorios de agua presentes en el subsuelo. Algunas hipótesis apuntan que la causa pudo ser la fusión de hielo subterráneo en periodos puntuales de temperaturas más cálidas, mientras que otras sugieren un origen debido a impactos meteoríticos o erupciones volcánicas. Estas grandes inundaciones parecen ser recientes y posiblemente dieron lugar a la circulación de agua durante cortos periodos de tiempo, insuficientes para la emergencia de la vida. Por tanto, si queremos saber si la vida pudo surgir en Marte en el pasado, lo que debemos preguntarnos es durante cuánto tiempo mantuvo una atmósfera que permitiera la permanencia de agua en su superficie (o quizás bajo ella).

La hipótesis más aceptada sobre la evolución de la atmósfera marciana plantea que, en épocas antiguas, el planeta poseía un núcleo metálico fundido que, debido a su movimiento de rotación, era capaz de generar un campo magnético que lo protegía del viento solar. Sin embargo, conforme el planeta se fue enfriando y se solidificó su núcleo, ese campo magnético se fue debilitando hasta desaparecer, dejando la

atmósfera totalmente expuesta a la acción del viento solar que logró dispersar gran parte de la misma en el espacio. La misión MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN) ha demostrado que Marte continúa perdiendo dióxido de carbono de su atmósfera, lo que hace pensar que en el futuro el planeta todavía será más frío e inhóspito.

A medida que Marte fue perdiendo su atmósfera, el planeta se fue enfriando y las condiciones para el mantenimiento de su agua en forma líquida se fueron haciendo cada vez más difíciles. Pero ¿qué pasó con el agua? Sabemos que una parte se congeló y permanece en los polos y otros lugares, como en el fondo de algunos cráteres. Otra parte probablemente se evaporó y, una vez en la atmósfera marciana, la luz ultravioleta del sol produjo la disociación de sus moléculas en átomos de hidrógeno y oxígeno que escaparon al espacio. Por último, la posibilidad más interesante de cara a la posible existencia de vida en el planeta rojo es que parte del agua se filtrara al subsuelo, donde puede permanecer entre los poros de las rocas o incluso formando reservorios. De hecho, algo así parecen indicar algunas imágenes tomadas por el radar del orbitador de la misión Mars Express.

Hay que tener en cuenta que las condiciones para que el agua se mantenga en forma líquida en el subsuelo son más favorables que en la superficie, ya que la presión es mayor y puede haber cercanía a alguna fuente de calor interno que produzca un aumento local de las temperaturas. Actualmente, la opinión científica está a favor de que el agua líquida se mantuvo en la superficie de Marte durante millones de años, pero parece claro que hace unos 3000 millones de años el planeta ya se había convertido en el desierto helado que es ahora. ¿Es ese tiempo suficiente para que surgiera la vida? No lo sabemos, pero conviene recordar que en esa época en la Tierra ya había seres microscópicos, parecidos a las bacterias actuales, y que probablemente eran incluso capaces de realizar la fotosíntesis.

¿Habrá vida en el subsuelo de Marte?

Si alguna vez la vida surgió en Marte, existe la posibilidad de que esta se iniciara en la superficie y, posteriormente, cuando se produjo el cambio climático y esta se enfrió, migrara al subsuelo, donde podría permanecer en algunos lugares particularmente favorables. También hay que considerar la alternativa de que la vida en Marte surgiera directamente en el subsuelo y se haya mantenido siempre oculta de la luz. El subsuelo no solo favorece la existencia de agua líquida, sino que proporciona protección frente a la radiación ultravioleta y los potentes rayos cósmicos. Mientras que una capa de suelo de unos centímetros de espesor ya es suficiente para impedir el paso de la radiación ultravioleta, los rayos cósmicos pueden llegar a mayor profundidad, por lo que la posible vida marciana tendría que estar varios metros bajo la superficie.

Ya hemos visto que en la Tierra eso no es problema, pues se han encontrado microorganismos a cientos de metros bajo tierra, llegándose incluso a estimar que la mayor diversidad biológica podría estar oculta en el subsuelo. Estos microorganismos no pueden obtener la energía necesaria para su metabolismo de la luz solar; en su lugar, utilizan la energía que se produce en reacciones químicas inorgánicas que pueden tener lugar entre los minerales que forman las rocas, algo que se ve muy favorecido cuando estas están en contacto con el agua. Pero no es necesario que haya grandes lagos u océanos subterráneos como mostraba Julio Verne en *Viaje al centro de la Tierra*, es suficiente con que las rocas puedan mantener cierto grado de humedad o retener el agua entre sus poros para que esas reacciones sean posibles. Dada la abundancia de óxidos de hierro en Marte, no es difícil dejar volar la imaginación y pensar en un metabolismo similar al que utilizan los microorganismos que viven en el subsuelo en las proximidades del río Tinto, donde el ciclo del hierro juega un papel fundamental para la vida microscópica.

El subsuelo, además, presenta la atrayente posibilidad de la cercanía a alguna fuente de calor interna, de modo que las reacciones del metabolismo podrían acelerarse, facilitándose así el aumento de la complejidad biológica. Es cierto que la vida que existe en el subsuelo terrestre es toda microscópica, pero eso no quiere decir que sea simple, ni mucho menos.

Todo anima a pensar que puede que en el subsuelo de Marte podamos encontrar vida con un origen distinto al terrestre, pero la pregunta ahora es: ¿cómo la buscamos? A pesar de que los *rovers* y *landers* que se envían a Marte cada vez llevan instrumentación más sofisticada, es difícil diseñar experimentos complejos que puedan realizarse de forma robotizada. Más aún, puesto que no sabemos cómo sería la posible vida marciana, es difícil incluso pensar qué tipo de experimentos habría que realizar para detectarla. Lo ideal sería poder traer rocas y someterlas a un análisis exhaustivo.

En ese sentido, ya hemos mencionado que el *rover* Perserverance está recogiendo rocas para ser traídas a la Tierra en una nueva misión, pero apenas está arañando la superficie de Marte, por lo que las rocas que está almacenando quizás estén demasiado próximas a la superficie para que conserven vida activa. Sí podrían contener biomarcadores que nos mostraran la existencia de una vida ya extinguida, por lo que todos esperamos con ansia ese retorno de muestras. La misión Mars Sample Return, para la que aún no hay fecha fijada, será la encargada de esa importante tarea. Para ello tendrá que llegar a Marte, recoger las muestras que ha dejado el Perseverance y embarcarlas en un pequeño cohete que despegará de Marte y las llevará hasta una órbita situada a 500 kilómetros de altura sobre su superficie. Allí, el cohete se reunirá con un orbitador que tendrá que ser capaz de recoger el contenedor con las muestras para emprender entonces el camino de regreso a la Tierra. Finalmente, otro sistema situaría las muestras dentro de un vehículo con un escudo térmico que permita una entrada segura a través de la atmósfera

terrestre, posiblemente a principios o mediados de la década de 2030.

Las preguntas que surgen ahora son: ¿por qué esperar?, ¿por qué no se ha enviado ya el equipamiento necesario para que las muestras recogidas por el Perseverance vengan a la Tierra? El problema básico es enviar la cantidad de combustible que hace falta para que un cohete venza la fuerza de la gravedad y alcance la velocidad de escape en la tenue atmósfera marciana. Para resolver este problema, el ya mencionado dispositivo MOXIE está realizando ensayos para lograr convertir el aire marciano en oxígeno. Si este gas se produce a gran escala, podría usarse no solo para respirar, sino también como combustible para el despegue de un cohete.

Es lógico que una misión de retorno de muestras de otro planeta suscite cierta preocupación entre algunas personas. ¿Podrían las rocas de Marte ser portadoras de microorganismos peligrosos para la vida terrestre? En principio hay que pensar que el riesgo es bajo, ya que cualquier patógeno, para ser exitoso, debe ser capaz de aprovechar los recursos del organismo que infecta y eso requiere que las moléculas y procesos utilizados por ambos sean similares. Por ejemplo, los virus pueden infectarnos porque están basados en moléculas parecidas a las que componen nuestras células. Pero un virus marciano lo tendría mucho más difícil, ya que probablemente sus moléculas y los procesos necesarios para su mantenimiento y reproducción no serían compatibles con nuestras células, por lo que sus posibilidades de éxito serían muy bajas. Es más preocupante la existencia de posibles microorganismos que fueran capaces de producir alguna molécula tóxica para la vida terrestre. Por esta razón, hay que ser precavidos y las muestras procedentes de Marte deberán estar en contenedores sellados que solo se abrirán cuando las condiciones sean lo suficientemente seguras.

En este contexto de detección de vida en Marte no podemos dejar de mencionar la misión ExoMars 2020 y su *rover*

Rosalind Franklin. Esta misión tenía previsto recoger y analizar muestras de una profundidad de hasta 2 metros, donde sabemos que las condiciones para la vida en Marte son mucho más favorables. Desafortunadamente, debido a la implicación de Rusia en la misión, esta se ha suspendido por la invasión de Ucrania. Aunque en estos momentos hay todavía mucha incertidumbre, parece que la NASA podría asumir el papel de Roscosmos, la agencia espacial rusa. Ojalá que sea así y pronto no solo arañemos la superficie de Marte, sino que lleguemos a profundizar en ella.

¿Enviaremos alguna vez humanos a Marte?

Una pregunta recurrente que mucha gente se hace es si lograremos algún día enviar seres humanos a Marte, igual que ya lo hemos hecho a nuestra luna. Existe incluso una iniciativa ya programada por la empresa SpaceX para enviar humanos a Marte en 2024. Eso sí, sin billete de vuelta. ¡Y lo sorprendente es que ya hay miles de voluntarios apuntados!

Lo cierto es que enviar humanos a Marte entraña enormes dificultades. Soñar que alguna vez ese planeta, con sus gélidas temperaturas, su baja presión atmosférica, su ausencia de oxígeno y sus elevadas dosis de radiación, pueda llegar a ser un nuevo hogar para la humanidad es algo de una enorme ingenuidad. Por muy duras que lleguen a ser las condiciones para la vida en la Tierra, siempre serán mejores que las que existen en Marte, así que lo mejor que podemos hacer es intentar cuidar nuestro planeta para que se siga manteniendo habitable para los seres humanos el máximo tiempo posible.

Una misión con humanos a Marte tendría que transportar no solo el peso de los astronautas y el combustible necesario para la vuelta, sino también todo lo necesario para su supervivencia durante el tiempo que permanecieran allí. Y eso no es trivial, ya que el viaje entre la Tierra y Marte

solo es factible en ciertos momentos en los que la distancia entre ambos planetas se reduce, de modo que el viaje *solo* dura entre tres y cuatro meses. Pero esos momentos ocurren una vez cada 26 meses, un largo tiempo que los astronautas tendrían que pasar en Marte. Quizás la tecnología permita extraer agua líquida y oxígeno *in situ*, pero producir comida en Marte es, hoy por hoy (y probablemente durante mucho tiempo), totalmente imposible. Ni siquiera las humildes patatas que consiguió cultivar Matt Damon en la película *The Martian* serían una posibilidad, ya que los percloratos del suelo marciano posiblemente impedirían su crecimiento.

Lo de pasear por el exterior de la nave espacial tampoco sería fácil. La menor gravedad de Marte dificultaría los movimientos, además de ser un grave riesgo para la salud si se permanece expuesto a ella durante mucho tiempo. La baja presión atmosférica requeriría el uso de trajes presurizados, y la falta de oxígeno haría que siempre hubiera que llevar una bombona bien cargada. Por otro lado, el vestuario para ese paseo también tendría que proporcionar suficiente protección frente a la intensísima radiación.

Algunos más optimistas, o quizás más soñadores, piensan en la posibilidad de cambiar Marte para hacerlo más parecido a la Tierra. Para ello, lo primero sería lograr aumentar su temperatura y su presión atmosférica. La propuesta más sencilla —y lo de *sencilla* hay que decirlo con muchas reservas— consistiría en enriquecer la atmósfera marciana en gases con un fuerte efecto invernadero. Para ello se ha pensado en la liberación de clorofluorocarbonos, que podrían lograr aumentar la temperatura lo suficiente como para que el dióxido de carbono atrapado en forma de hielo en las zonas polares pasara a gas. Aunque la idea es atractiva, llevarla a la práctica conlleva enormes dificultades: los clorofluorocarbonos son poco estables en presencia de luz solar, por lo que su producción tendría que ser continuada y en grandes

cantidades. Y lo de continuada no significa unos meses o unos pocos años, sino miles de ellos.

La conclusión es que quizás en el futuro pueda haber misiones tripuladas a Marte, pero el establecimiento de grandes colonias de humanos en el planeta está muy alejado de cualquier posibilidad real.

Las lunas del sistema solar

Nuestra luna

Nuestro planeta tiene un único satélite, al que llamamos coloquialmente *la luna*, como si esta fuera la única que existe en el universo. La Luna ha hecho que la Tierra sea un planeta más habitable al equilibrar la inclinación de su eje, permitiendo que el clima sea relativamente estable. Con un radio de aproximadamente 1740 kilómetros, tiene menos de un tercio del ancho de la Tierra. Está situada a 384 400 kilómetros de distancia, pero se está alejando lentamente de nosotros, a una velocidad de aproximadamente 2,5 centímetros por año. La Luna tarda el mismo tiempo en girar alrededor de su eje que en completar una vuelta alrededor de la Tierra, siendo esta la razón por la que siempre muestra el mismo hemisferio orientado hacia nosotros. Al igual que la Tierra, la Luna también tiene un núcleo, un manto y una corteza. La ausencia de tectónica de placas hace que tenga una superficie intensamente craterizada que está cubierta por polvo y fragmentos de roca.

Las temperaturas en la Luna sufren enormes oscilaciones durante el día y la noche. Por el día pueden alcanzar los 127 °C y por la noche llegan a bajar hasta –173 °C. Difícil imaginar que pueda haber vida en esas condiciones. En los inicios de la exploración lunar se pensó que carecía de agua. Sin embargo, en 2008, la misión india Chandrayaan-1 detectó iones hidroxilo esparcidos por la superficie y concentrados

en los polos. Otras misiones, como Lunar Prospector, LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) y Lunar Reconnaissance Orbiter, han demostrado que existen altas concentraciones de agua helada en las regiones de los polos lunares que están en sombra permanente. También se ha descubierto que la superficie lunar puede liberar su agua por vaporización cuando recibe impactos de micrometeoritos. En observaciones posteriores se ha sugerido que puede haber hielo de agua distribuido por toda la superficie, y no estar limitado a los lugares más fríos y sombríos.

Las numerosas misiones que han explorado la Luna no han encontrado ninguna prueba que sugiera que pueda haber vida en ella. Sin embargo, la Luna podría ser el lugar de una futura colonización por parte de los humanos o constituir una importante base desde la que desplazarnos a otros lugares. El descubrimiento de que la Luna alberga hielo de agua hace que la miremos con otros ojos y que haga todavía más interesante su exploración. El programa Artemis, desarrollado por la NASA junto con otras agencias internacionales, es crucial para conseguir estos objetivos.

Europa: un lugar prometedor para la vida en las cercanías de Júpiter

Júpiter tiene decenas de lunas orbitando a su alrededor. De ellas, la que más fuertemente ha atraído la atención de los astrobiólogos es Europa. Esta luna tiene un radio de 1561 kilómetros —aproximadamente cuatro veces menor que el de la Tierra—, pero podría albergar una cantidad de agua mucho mayor que la que existe en nuestro planeta.

Europa fue descubierta por Galileo en 1610. En la década de los sesenta del siglo XX, las observaciones con telescopios terrestres determinaron que su superficie estaba compuesta mayoritariamente por hielo de agua. Las sondas Voyager de la NASA revelaron que la superficie de Europa

es más brillante que la de nuestra luna y está surcada por numerosas bandas oscuras. La casi total ausencia de grandes cráteres de impacto sugiere que ha tenido que haber algún proceso que los haya borrado. Otra observación importante es que las bandas oscuras tenían lados opuestos que encajaban muy bien entre sí. Parecía como si la superficie se hubiera fracturado y el material oscuro y helado del interior hubiera fluido a través de las grietas. Un análisis más detallado mostró que las grandes placas de hielo de Europa parecían desplazarse unas con respecto a otras, como podría ocurrir si existiera una masa líquida entre la corteza y el núcleo rocoso del satélite.

Posteriormente, las observaciones realizadas por la misión Galileo, que entró en órbita alrededor de Júpiter en 1995, mostraron que el campo magnético de este planeta se veía alterado en las cercanías de Europa, algo que parecía implicar que el satélite también poseía su propio campo magnético. Para que eso fuera posible, bajo su corteza debía existir una capa profunda de algún fluido eléctricamente conductor. Actualmente, hay fuertes evidencias de que esa capa fluida corresponde a un gigantesco océano de agua salada en estado líquido de unos 100 kilómetros de espesor. Para hacernos una idea de lo que esto significa, no hay más que recordar que la profundidad media de los océanos terrestres es de solo cuatro kilómetros.

La fuerte atracción provocada por Júpiter sobre la corteza de Europa produce fuerzas de marea que expanden y comprimen su superficie de forma periódica. Este proceso puede generar calor suficiente para mantener un océano líquido subsuperficial. ¿Sería posible la vida en ese océano? Para ello, este debería contener los ingredientes esenciales para la química de la vida. Es muy probable que estos elementos estuvieran ya presentes en el momento de la formación de la luna y que un aporte mayor de material llegara gracias a los impactos de asteroides y cometas. El calentamiento provocado por las mareas podría impulsar un sistema que recicla el

agua y los nutrientes entre la corteza helada, el océano interno y el interior rocoso, creándose así un ambiente propicio para la vida.

Al igual que hemos mencionado para el caso del subsuelo de Marte, la posible vida en el océano de Europa obtendría su energía de reacciones químicas inorgánicas. Si hay zonas en las que el océano entra en contacto con el núcleo rocoso caliente del satélite, entonces, al igual que sucede en las chimeneas volcánicas submarinas terrestres, se podría producir la disolución de minerales que reaccionarían entre ellos, proporcionando así la energía necesaria para la vida

La misión Europa Clipper de la NASA tiene previsto su lanzamiento para octubre de 2024 y llegará a Júpiter en octubre de 2030. Su principal objetivo científico es confirmar la presencia de este océano e investigar sus condiciones de habitabilidad. Para ello realizará mediciones de la deformación de la superficie de Europa producida como consecuencia de las mareas inducidas por Júpiter. Si el océano interior existe, las mareas deberían deformar la superficie unos 30 metros, mientras que, si no existiera, la superficie se deformaría mucho menos. También será de gran interés determinar la composición del material rojizo que bordea las grietas de Europa, algo que puede dar pistas sobre si el océano interno contiene los ingredientes necesarios para la vida. Por último, estudiará si hay circulación de material entre la superficie y el interior, y los posibles signos de actividad interna en el planeta que podrían permitir el desplazamiento de las placas de la corteza o facilitar el escape de parte del agua a la superficie.

Encélado: un pequeño mundo con un gran océano subterráneo

Encélado es una pequeña luna de Saturno que tiene un radio de 252 kilómetros y que, al igual que Europa, posee un gran océano subsuperficial del que emanan inmensos surtidores

que lanzan gigantescos chorros de agua al espacio. La sonda Cassini de la NASA ha tomado muestras de esta agua y su análisis ha reflejado que posee la mayoría de los componentes químicos necesarios para la vida.

La sonda Cassini también descubrió que las partículas de agua helada y el gas que brotan de la superficie lo hacen a una velocidad de aproximadamente 400 metros por segundo. Las erupciones parecen ser continuas, generando un enorme halo de fino polvo de hielo alrededor de Encélado que, además de suministrar material a uno de los anillos de Saturno (el anillo E), cae de regreso a la superficie de la luna, creando una superficie blanca y brillante que hace que Encélado sea el cuerpo que más luz refleja en todo el sistema solar. Debido a este hecho, la temperatura de su superficie es extremadamente fría, alrededor de –201 °C.

El anillo E de Saturno está formado en su mayor parte por gotas de hielo, pero entre ellas hay unos peculiares nanogranos de sílice, que solo pueden generarse cuando el agua líquida interacciona con rocas a temperaturas superiores a los 90 °C. Dado que este material procede del océano de Encélado, el hallazgo sugiere que sus aguas se filtran hacia el interior rocoso del planeta, calentándose y volviendo a emanar en forma de chimeneas hidrotermales, alrededor de las cuales puede desarrollarse una química muy rica capaz de proporcionar energía y las moléculas necesarias para la vida. Con su océano global, su química única y su calor interno, Encélado se ha convertido en uno de los lugares más prometedores en nuestra búsqueda de escenarios para la vida fuera de la Tierra.

El gigantesco laboratorio químico de Titán

Otra luna de Saturno, Titán, es un mundo helado cuya superficie está completamente oculta por una densa atmósfera dorada que se extiende unos 600 kilómetros en el espacio y proporciona una presión 70 veces superior a la terrestre. Con un

radio de 2575 kilómetros, Titán es la segunda luna más grande de nuestro sistema solar, solo superada por Ganímedes; es incluso más grande que el planeta Mercurio.

Esta gigantesca luna es el único cuerpo planetario conocido, aparte de la Tierra, que tiene masas líquidas permanentes en su superficie, aunque estas masas no están formadas por agua, sino por metano y etano. En el satélite existe un ciclo del metano similar al del ciclo del agua en la Tierra, es decir, el metano se evapora, se condensa en la atmósfera y vuelve a caer en forma de lluvia sobre la superficie. Debido a su enorme distancia al Sol, la luz que recibe es muy escasa. Su eje de rotación está inclinado, lo que hace que posea estaciones, al igual que sucede en la Tierra; sin embargo, debido al largo tiempo que tarda en dar una vuelta alrededor del Sol, cada estación dura unos siete años terrestres.

La estructura interna de Titán no se conoce del todo, pero los modelos basados en los datos obtenidos por la misión Cassini-Huygens sugieren que Titán tiene cinco capas primarias. La más interna es un núcleo de roca, alrededor de la cual hay una capa de hielo de agua de un tipo especial que solo se encuentra a presiones extremadamente altas. Este hielo está rodeado por una capa de agua líquida salada, sobre la que se asienta una corteza exterior de hielo de agua. La superficie estaría recubierta de moléculas orgánicas y, encima de ella, se situaría la densa atmósfera. El descubrimiento de un océano global de agua líquida en Titán despierta las expectativas de que este satélite pueda contener vida similar a la terrestre. Pero, además, los ríos, lagos y mares de metano y etano líquidos podrían también ser ambientes habitables, aunque la vida que existiría allí tendría que ser muy diferente de la de la Tierra.

La superficie de Titán es uno de los lugares más parecidos a la Tierra dentro del sistema solar, aunque a temperaturas mucho más frías (alrededor de −180 °C) y con una química diferente. Titán tiene pocos cráteres de impacto visibles, lo

que significa que debe de haber alguna combinación de procesos que borre sus huellas. Su atmósfera está compuesta principalmente por nitrógeno (alrededor del 95%) y metano (alrededor del 5%), con pequeñas cantidades de otros compuestos ricos en carbono. En ella, las moléculas de metano y nitrógeno se disocian por la luz ultravioleta del sol y el impacto de partículas de alta energía. Los restos moleculares producidos se recombinan para formar una variedad de productos químicos orgánicos, algunos de los cuales son importantes para la vida en la forma que existe en la Tierra.

El metano es lo que hace posible la compleja química atmosférica de Titán, pero el origen de todo ese metano es un misterio. Dado que la luz solar lo descompone continuamente, alguna fuente debe reponerlo o se agotaría con el tiempo. Aunque hasta ahora no hay pruebas de vida en Titán, su compleja química y sus entornos únicos lo convertirán sin duda en un destino para seguir explorando.

EPÍLOGO

La existencia de inteligencia extraterrestre

Todo lo que hemos descrito muestra que hay fuertes argumentos a favor de la existencia de vida extraterrestre. Sin embargo, en ningún momento hemos hablado de vida inteligente, limitándonos a centrarnos en las posibilidades de vida microscópica. ¿Significa eso que creemos que no puede existir más vida inteligente en el universo que la que existe en la Tierra? Lo cierto es que, aunque no tenemos ninguna certeza de ello, de ningún modo descartamos esta posibilidad. Lo que ocurre es que la aparición de inteligencia requiere un grado de complejidad biológica que precisaría tiempos muy largos para surgir. Además, la mayor complejidad suele ir asociada a mayor fragilidad y al requerimiento de un rango más estrecho en los valores de los parámetros fisicoquímicos para poder mantenerse. Si recordamos lo que hemos detallado sobre los extremófilos, vemos que casi todos son microscópicos y eso, seguramente, no es una casualidad. El hombre también puede soportar condiciones extremas, pero lo hace modificando el medio de forma consciente, una capacidad que tardó mucho tiempo en aparecer en el transcurso de la evolución.

La vida compleja también suele reproducirse más lentamente y producir menos mutaciones durante la copia de su

material genético. Eso implica menor capacidad de adaptación a los cambios ambientales. Y los cambios son inevitables. Siempre se ha dicho que, si hubiera un desastre global, los organismos que nos sobrevivirían serían las bacterias. Y es bastante probable. Quizás algunos pequeños grupos de humanos podrían encontrar algún tipo de refugio en el que recrear condiciones óptimas para su existencia, pero la vida humana, con 8000 millones de seres sobre el planeta, sería solo un recuerdo del pasado.

Pensemos en la historia de la vida en la Tierra. Existen evidencias de vida microbiana de una antigüedad de al menos 3500 millones de años. Y toda esa vida no fue "barrida" por la emergencia de la vida más compleja. Es más, por las investigaciones realizadas sobre la microbiota sabemos que los organismos complejos dependen de los microorganismos que portan en su interior para muchas de sus funciones vitales. Sin embargo, los microorganismos se las han apañado bastante bien cuando eran los únicos habitantes de este planeta, lo cual no quiere decir que no se beneficiaran de la cooperación entre ellos para conseguir optimizar su funcionamiento.

Si reescaláramos la historia del universo y la representáramos en un calendario de un año, veríamos que la formación de la Tierra y el origen de la vida no ocurren hasta septiembre. En diciembre surgen los primeros organismos multicelulares. Y no es hasta el 31 de diciembre cuando aparece el hombre. Y durante la mayor parte de ese trascendental día (al menos para nosotros), el hombre no fue capaz de enviar señales de su existencia a sus eventuales compañeros del cosmos. Casi en el momento de tomar las uvas fue cuando, por primera vez, fuimos capaces de enviar ondas electromagnéticas al espacio, lo único que puede viajar a la velocidad suficiente para quizás poder ser detectado por otra civilización. Llevamos poco más de cien años emitiendo ese tipo de señales, lo que quiere decir que, como mucho, se habrán desplazado algo más de cien años luz, siendo cada vez más débiles

según aumentaba la distancia recorrida. Cien años luz nos puede parecer un gran recorrido, pero, cuando uno piensa en la inmensidad del universo, se da cuenta de lo poco que eso significa.

La realidad es que, para detectar vida inteligente, tenemos que coincidir en el tiempo y estar a la distancia adecuada de otra civilización que esté en condiciones de emitir señales de su existencia o de reconocer las señales de la nuestra. Y eso, como hemos visto, no es fácil. No solo es que las distancias en el espacio sean enormes, sino que desconocemos cuánto puede perdurar una civilización inteligente antes de extinguirse.

Los datos que tenemos de nuestro planeta no son muy halagüeños. En un brevísimo espacio de tiempo hemos conseguido contaminar nuestros océanos, cambiar el clima, poner en riesgo la capa de ozono y causar la extinción de un buen número de especies. Quizás, en nuestra pretensión por lograr una vida mejor, algo que se podría decir que hemos conseguido gracias a nuestra inteligencia, estemos convirtiendo nuestro planeta en inhabitable para nuestra especie. Necesitamos una inteligencia con más amplitud de miras, que no se limite al beneficio inmediato sin valorar las consecuencias globales y a largo plazo. No es que estemos haciendo un alegato en contra de la tecnología, pero quizás estamos yendo demasiado rápido para lo que puede soportar nuestro planeta y lo que puede abarcar nuestra mente. Lo cual es una forma de hablar, porque nuestro planeta lo soportará, pero quizás cambie tanto que los que no lo soportemos seamos nosotros.

Faltaría por definir qué entendemos por inteligencia. Si simplemente pensamos en la capacidad que tenemos los humanos para aprovechar los recursos del medio en nuestro beneficio, no hay duda de que seríamos la especie más inteligente del planeta. Pero puede haber otras formas de inteligencia que no sabemos valorar porque no encajan con la percepción que tenemos de ese concepto. Sin salir de la Tierra, hay

muchas especies capaces de relacionarse entre ellas, que tienen habilidades cognitivas complejas y que, a su modo, también buscan su felicidad. Si eso sucede en la Tierra, ¡qué no podrá haber en otros lugares del espacio, en los que la vida tenga otro origen y haya evolucionado en función de otras condiciones ambientales! Puede que, a pesar de las lecciones de Copérnico y Darwin, todavía nos siga sobrando orgullo y nos siga faltando comprensión hacia el resto de la naturaleza.

Para finalizar este libro, no querríamos hacerlo de un modo pesimista. El hombre, a lo largo de la historia, también ha demostrado una gran generosidad, una gran empatía hacia los sentimientos de los demás y una capacidad casi ilimitada para superarse. ¡Ojalá que todo esto sea utilizado para paliar los grandes retos a los que tendrá que enfrentarse nuestra especie en los próximos siglos!

Bienvenidos al futuro. Todos, los terrestres y, ojalá que también, los extraterrestres.

Bibliografía

Abrahamsson, Victor y Kanik, Isik (2022): "*In situ* organic biosignature detection techniques for space applications", *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, 959670.

Aguilera, Ángeles; Souza-Egipsy, Virginia y González-Toril, Elena (2020): *La vida en Río Tinto*, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Madrid.

Barrado Navascués, David (2021): *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*, Real Sociedad Española de Física / Fundación Ramón Areces / Los Libros de la Catarata, Madrid.

Benner, Steven A. (2010): "Defining life", *Astrobiology*, 10(10), pp. 1021-1030.

Briones, Carlos (2020): *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*, Crítica, Barcelona.

Cockell, Charles S. (2020): *Astrobiology: Understanding life in the Universe*, Wiley-Blackwell, Nueva Jersey.

Domagal-Goldman, Shawn D. y Wright, Katherine E. (eds.) (2016): "The Astrobiology Primer v2.0", *Astrobiology*, 16(8), pp. 561-653.

Lázaro Lázaro, Ester (2019): *La vida. Un viaje hacia la complejidad en el universo*, Editorial Fundación Sicomoro, Madrid.

LINGAM, Manasvi y LOEB, Avi (2021): *Life in the Cosmos. From biosignatures to technosignatures*, Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts).

MAY, Andrew (2019): *The Search for Life Elsewhere in the Universe* (Hot Science Book 0), Icon Books, Londres.

MCKAY, David S. *et al.* (1996): "Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH84001", *Science*, 273(5277), pp. 924-930.

MERINO, Nancy *et al.* (2019): "Living at the extremes: Extremophiles and the limits of life in a planetary context", *Frontiers in Microbiology*, 10.

SASSELOV, Dimitar D.; GROTZINGER, John P. y SUTHERLAND, John D. (2020): "The origin of life as a planetary phenomenom", *Science Advances*, 6(6), eaax3419.

SCHELLER, Eva L. *et al.* (2022): "Aqueous alteration processes in Jezero crater, Mars–implications for organic geochemistry", *Science*, 378(6624), pp. 1105-1110.

VAQUERIZO, Juan Ángel (2020): *Marte y el enigma de la vida*, CSIC / Los Libros de la Catarata, Madrid.

WALKER, Chritopher K. (2023): *Investigating life in the Universe: Astrobiology and the search for extraterrestrial life*, CRC Press, Boca Ratón (Florida).

Fuentes electrónicas

Agencia Espacial Europea (ESA): https://www.esa.int/
NASA: https://www.nasa.gov/
NASANET: https://www.lanasa.net/

Títulos de la colección ¿Qué sabemos de?

1. **El LHC y la frontera de la física.** Alberto Casas
2. **El Alzheimer.** Ana Martínez
3. **Las matemáticas del sistema solar.** Manuel de León, Juan Carlos Marrero y David Martín de Diego
4. **El jardín de las galaxias.** Mariano Moles Villamate
5. **Las plantas que comemos.** Pere Puigdomènech
6. **Cómo protegernos de los peligros de Internet.** Gonzalo Álvarez Marañón
7. **El calamar gigante.** Ángel Guerra Sierra y Ángel González González
8. **Las matemáticas y la física del caos.** Manuel de León y Miguel Ángel F. Sanjuan
9. **Los neandertales.** Antonio Rosas
10. **Titán.** María Luisa Lara
11. **La nanotecnología.** Pedro A. Serena Domingo
12. **Las migraciones de España a Iberoamérica desde la Independencia.** Consuelo Naranjo Orovio
13. **El lado oscuro del universo.** Alberto Casas
14. **Cómo se comunican las neuronas.** Juan Lerma
15. **Los números.** Javier Cilleruelo y Antonio Córdoba
16. **Agroecología y producción ecológica.** Antonio Bello, Concepción Jordá y Julio César Tello
17. **La presunta autoridad de los diccionarios.** Javier López Facal
18. **El dolor.** Pilar Goya Laza y María Isabel Martín Fontelles
19. **Los microbios que comemos.** Alfonso V. Carrascosa
20. **El vino.** María Victoria Moreno-Arribas
21. **Plasma: el cuarto estado de la materia.** Teresa de los Arcos e Isabel Tanarro
22. **Los hongos.** María Teresa Tellería
23. **Los volcanes.** Joan Martí Molist
24. **El cáncer y los cromosomas.** Karel H. M. van Wely
25. **El síndrome de Down.** Salvador Martínez Pérez
26. **La química verde.** José Manuel López Nieto
27. **Princesas, abejas y matemáticas.** David Martín de Diego
28. **Los avances de la química.** Bernardo Herradón García
29. **Exoplanetas.** Álvaro Giménez

30. **La sordera.** Isabel Varela Nieto y Luis Lassaletta Atienza
31. **Cometas y asteroides.** Pedro José Gutiérrez Buenestado
32. **Incendios forestales.** Juli G. Pausas
33. **Paladear con el cerebro.** Francisco Javier Cudeiro Mazaira
34. **Meteoritos.** Josep María Trigo Rodríguez
35. **Parasitismo.** Juan José Soler
36. **El bosón de Higgs.** Alberto Casas y Teresa Rodrigo
37. **Exploración planetaria.** Rafael Rodrigo
38. **La geometría del universo.** Manuel de León
39. **La metamorfosis de los insectos.** Xavier Bellés
40. **La vida al límite.** Carlos Pedrós-Alió
41. **El significado de innovar.** Elena Castro Martínez e Ignacio Fernández de Lucio
42. **Los números trascendentes.** Javier Fresán y Juanjo Rué
43. **Extraterrestres.** Javier Gómez-Elvira y Daniel Martín Mayorga
44. **La vida en el universo.** F. Javier Martín-Torres y Juan Francisco Buenestado
45. **La cultura escrita.** José Manuel Prieto
46. **Biomateriales.** María Vallet Regí
47. **La caza como recurso renovable y la conservación de la naturaleza.** Jorge Cassinello Roldán
48. **Rompiendo códigos.** Manuel de León y Ágata Timón
49. **Las moléculas: cuando la luz te ayuda a vibrar.** José Vicente García Ramos
50. **Las células madre.** Karel H. M. van Wely
51. **Los metales en la Antigüedad.** Ignacio Montero
52. **El caballito de mar.** Miquel Planas Oliver
53. **La locura.** Rafael Huertas
54. **Las proteínas de los alimentos.** Rosina López Fandiño
55. **Los neutrinos.** Sergio Pastor Carpi
56. **Cómo funcionan nuestras gafas.** Sergio Barbero Briones
57. **El grafeno.** Rosa Menéndez y Clara Blanco
58. **Los agujeros negros.** José Luis Fernández Barbón
59. **Terapia génica.** Blanca Laffon, Vanessa Valdiglesias y Eduardo Pásaro
60. **Las hormonas.** Ana Aranda
61. **La mirada de Medusa.** Francisco Pelayo
62. **Robots.** Elena García Armada
63. **El Parkinson.** Carmen Gil y Ana Martínez
64. **Mecánica cuántica.** Salvador Miret Artés
65. **Los primeros homininos.** Antonio Rosas
66. **Las matemáticas de los cristales.** Manuel de León y Ágata Timón
67. **Del electrón al chip.** Gloria Huertas Sánchez, Luisa Huertas Sánchez y José L. Huertas Díaz
68. **La enfermedad celíaca.** Yolanda Sanz Herranz y María del Carmen Cénit Laguna
69. **La criptografía.** Luis Hernández Encinas
70. **La demencia.** Jesús Ávila
71. **Las enzimas.** Francisco J. Plou
72. **Las proteínas dúctiles.** Inmaculada Yruela Guerrero
73. **Las encuestas de opinión.** Joan Font Fàbregas y Sara Pasadas del Amo
74. **La alquimia.** Joaquín Pérez Pariente
75. **La epigenética.** Carlos Romá Mateos
76. **El chocolate.** María Ángeles Martín Arribas
77. **La evolución del género 'Homo'.** Antonio Rosas
78. **Neuromatemáticas.** José María Almira y Moisés Aguilar
79. **La microbiota intestinal.** Carmen Peláez y Teresa Requena
80. **El olfato.** Laura López-Mascaraque y José Ramón Alonso
81. **Las algas que comemos.** Miguel Herrero y Elena Ibáñez
82. **Los riesgos de la nanotecnología.** Marta Bermejo Bermejo y Pedro A. Serena Domingo

83. **Los desiertos y la desertificación.** Jaime Martínez Valderrama
84. **Matemáticas y ajedrez.** Razvan Iagar
85. **Los alucinógenos.** José Antonio López Sáez
86. **Las malas hierbas.** César Fernández-Quintanilla y José Luis González Andújar
87. **Inteligencia artificial.** Ramón López de Mántaras y Pedro Meseguer
88. **Las matemáticas de la luz.** Manuel de León y Ágata Timón
89. **Cultivos transgénicos.** José Pío Beltrán
90. **El Antropoceno.** Valentí Rull
91. **La gravedad.** Carlos Barceló Serón
92. **Cómo se fabrica un medicamento.** María del Carmen Fernández Alonso y Nuria E. Campillo
93. **Los falsos mitos de la alimentación.** Miguel Herrero
94. **El ruido.** Pedro Cobo Parra y María Cuesta Ruiz
95. **La locomoción.** Adrià Casinos Pardo
96. **Antimateria.** Beatriz Gato Rivera
97. **Las geometrías y otras revoluciones.** Marina Logares
98. **Enanas marrones.** María Cruz Gálvez Ortiz
99. **Las tierras raras.** Ricardo Prego Reboredo
100. **El LHC y la frontera de la física.** Alberto Casas
101. **La tabla periódica de los elementos químicos.** José Elguero Bertolino, Pilar Goya Laza y Pascual Román Polo
102. **La aceleración del universo.** Pilar Ruiz Lapuente
103. **Blockchain.** David Arroyo Guardeño, Jesús Díaz Vico y Luis Hernández Encinas
104. **El albinismo.** Lluís Montoliu José
105. **Biología cuántica.** Salvador Miret Artés
106. **Islam e islamismo.** Cristina de la Puente
107. **El ADN.** Carmen Mora Gallardo y Karel H. M. van Wely
108. **Big data.** David Ríos Insua y David Gómez-Ullate Oteiza
109. **Verdades y mentiras de la física cuántica.** Carlos Sabín
110. **La quiralidad, el mundo al otro lado del espejo.** Luis Gómez-Hortigüela Sainz
111. **Las diatomeas y los bosques invisibles del océano.** Pedro Cermeño Aínsa
112. **Los bacteriófagos.** Lucía Fernández Llamas, Diana Gutiérrez Fernández, Ana Rodríguez González y Pilar García Suárez
113. **Nanomecánica.** Daniel Ramos Vega
114. **Cerebro y ejercicio.** José Luis Trejo y Coral Sanfeliu
115. **Enfermedades raras.** Francesc Palau
116. **La innovación y sus protagonistas.** Elena Castro Martínez e Ignacio Fernández de Lucio
117. **Marte y el enigma de la vida.** Juan Ángel Vaquerizo
118. **Las matemáticas de la pandemia.** Manuel de León y Antonio Gómez Corral
119. **Ciberseguridad.** David Arroyo Guardeño, Víctor Gayoso Martínez y Luis Hernández Encinas
120. **Pensar en español.** Reyes Mate
121. **La esclerosis múltiple.** Leyre Mestre y Carmen Guaza
122. **Por qué y cómo se hace la ciencia.** Pere Puigdomènech
123. **Nanotecnología para el desarrollo sostenible.** Pedro A. Serena Domingo
124. **Los coloides.** Rodrigo Moreno Botella
125. **De la micro a la nanoelectrónica.** José M. de la Rosa
126. **Las hormigas.** José Manuel Vidal Cordero
127. **Nuevos usos para viejos medicamentos.** Nuria E. Campillo, María Mercedes Jiménez Sarmiento y María del Carmen Fernández Alonso
128. **El Neolítico.** Juan F. Gibaja Bao, Millán Mozota Holgueras y Juan José Ibáñez
129. **Los superalimentos.** Jara Pérez Jiménez

130. **El vacío.** José Ángel Martín Gago
131. **Los robots y sus capacidades.** Elena García Armada
132. **Los alimentos ultraprocesados.** Javier Sánchez Perona
133. **Las vacunas.** María Mercedes Jiménez Sarmiento, Nuria E. Campillo y Matilde Cañelles
134. **Análisis de riesgos.** David Ríos Insua y Roi Naveiro Flores
135. **La salud planetaria.** Fernando Valladares, Xiomara Cantera y Adrián Escudero
136. **La contaminación lumínica.** Alicia Pelegrina López
137. **Origen y evolución de 'Homo sapiens'.** Antonio Rosas
138. **Física cuántica y relativista.** Carlos Sabín
139. **El plancton y las redes tróficas marinas.** Albert Calbet Fabregat
140. **El café.** María Dolores del Castillo y Amaia Iriondo
141. **La nanomedicina.** Fernando Herranz Rabanal
142. **Cómo se meten ocho millones de especies en un planeta.** Ignasi Bartomeus

¿QUÉ SABEMOS DE?

La vida y su búsqueda más allá de la Tierra

¿Quién no ha fantaseado alguna vez con la existencia de seres extraterrestres? Desde épocas antiguas, la posibilidad de vida fuera de la Tierra ha atraído la imaginación del ser humano y se ha plasmado en numerosas manifestaciones de nuestra cultura, entre las que se incluyen las religiones, la filosofía, el cine o la literatura de ciencia ficción. La ciencia no ha sido ajena a esta inquietud y, desde que la tecnología lo ha permitido, tiene como uno de sus objetivos investigar si los procesos que han conducido a la aparición de la vida en la Tierra podrían ocurrir en otros lugares del universo. ¿Qué tipo de vida extraterrestre es más probable que encontremos? ¿Qué características tendría que tener un objeto que halláramos fuera de la Tierra para ser considerado un ser vivo? ¿Podría la vida terrestre prosperar en las condiciones ambientales de otros planetas? Y si no fuera así, ¿podríamos transformar esos planetas para hacerlos más similares al nuestro?

ISBN: 978-84-00-11130-4







